

PROTOCOLO PARA LA IMPRESIÓN DE MODELOS 3D EN LESIONES ÓSEAS COMPLEJAS DEL SERVICIO DE CIRUGÍA ORTOPÉDICA Y TRAUMATOLOGÍA DEL HGUCS

TRABAJO DE FIN DE GRADO
GRADO EN MEDICINA
UNIVERSITAT JAUME I

Autora: Celia Montón Gómez

Tutoras: Nuria Isabel Olmedo García y Adela Mesado Vives

SERVICIO DE CIRUGÍA ORTOPÉDICA Y TRAUMATOLOGÍA
HOSPITAL GENERAL UNIVERSITARI DE CASTELLÓ



TRABAJO DE FIN DE GRADO (TFG) - MEDICINA

EL/LA PROFESOR/A TUTOR/A hace constar su **AUTORIZACIÓN** para la Defensa Pública del Trabajo de Fin de Grado y **CERTIFICA** que el/la estudiante lo ha desarrollado a lo largo de 6 créditos ECTS (150 horas)

TÍTULO del TFG: Protocolo para la impresión de modelos 3D en lesiones óseas complejas del servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HGUCS

ALUMNO/A: Celia Montón Gómez

DNI: 20907665-K

PROFESOR/A TUTOR/A: Nuria Isabel Olmedo García

Fdo (Tutor/a):

Trabajo de Fin de Grado: PROTOCOLO PARA LA IMPRESIÓN DE MODELOS 3D EN LESIONES ÓSEAS COMPLEJAS DEL SERVICIO DE CIRUGÍA ORTOPÉDICA Y TRAUMATOLOGÍA DEL HOSPITAL GENERAL UNIVERSITARIO DE CASTELLÓ

Autora:

Celia Montón Gómez, estudiante de sexto curso de Medicina en la Universidad Jaume I

Dirección:

Nuria Isabel Olmedo García, médica especialista en Cirugía Ortopédica y Traumatología del Hospital General Universitario de Castellón

RESUMEN

Introducción

El desarrollo de la tecnología 3D está en auge desde hace unos años. En el ámbito médico, ha demostrado ser beneficiosa en diferentes sectores, siendo uno de ellos el tratamiento quirúrgico.

Las intervenciones quirúrgicas más sencillas requieren destreza manual y capacidad de compresión anatómica, muchas veces alcanzables únicamente con la práctica repetida. Esta práctica se dificulta en el caso de patología sobre variantes anatómicas poco comunes en la población general o en localizaciones complejas, como ocurre en la patología de cadera.

Objetivos

La necesidad de planificación prequirúrgica y desarrollo de habilidades manuales puede justificar la necesidad de un protocolo que permita al médico especialista de COT conocer las herramientas necesarias para obtener su propio modelo anatómico 3D y cómo utilizarlas de manera sencilla.

Métodos

Tras una búsqueda bibliográfica en PubMed sobre las aplicaciones de la impresión 3D (I3D) en medicina, las técnicas y materiales empleados, junto con recomendaciones y tutoriales de equipos hospitalarios con cierto recorrido en este ámbito, se realizó un protocolo para la obtención de modelos 3D a partir de imágenes TAC.

Conclusiones

La fabricación de modelos 3D en los servicios hospitalarios particulares es un proceso sencillo y rápido, que ha demostrado ofrecer beneficios tanto para los especialistas (mejora de habilidades prácticas) como para los pacientes (mejores resultados quirúrgicos).

Palabras clave: impresión 3D, 3D Slicer, modelos anatómicos, planificación prequirúrgica, cirugía de cadera

ABSTRACT

Introduction

Development in three-dimensional (3D) technology has been on the rise for a few years now. In the medical field, it has proven to be beneficial in different areas, one of them being surgical treatment.

Simple surgical interventions require manual dexterity and anatomical understanding, often achievable only with repeated practice. This practice becomes difficult in the case of pathology on uncommon anatomical variants among the general population, or in complex locations, as is the case of hip pathology.

Objectives

The need for pre-surgical planning and development of manual skills may justify the elaboration of a protocol allowing a specialist in orthopaedic surgery and traumatology to be familiar with the tools necessary to obtain their own 3D anatomical model as well as their usage in a simple way.

Methodology

A literature search in PubMed on the applications of 3D printing in medicine and its techniques and materials employed was conducted. Together with the recommendations and guidelines from hospital teams with certain experience in this field, a protocol was drawn up for obtaining 3D models from CAT images.

Conclusions

The fabrication of 3D models in different hospital services is a simple and fast process which has proven to offer benefits for both specialists (improved practical skills) and patients (better surgical outcomes) alike.

Keywords: 3D printing, 3D Slicer, anatomical models, pre-surgical planning, hip surgery

EXTENDED SUMMARY

Introduction

Technological advances carried out in the medical field allow for an improvement in the diagnosis and therapeutic procedures for patients. Such is the case of the three-dimensional (3D) printing of objects, which, since the last years, has become a major line of development.

Eventually, production costs have reduced to the point where it is possible to own a 3D printer at an individual user level. This has made its application in certain specializations within hospital services more feasible, especially in those in which this tool has a longer history of use, as it happens in orthopaedic surgery and traumatology.

Evidence published in this regard seems to agree on the potential benefits of its implementation in daily clinical practice. Among them, there is:

1. The fabrication of patient-specific anatomical models, which improve anatomical understanding and allow for the most adequate surgical planning.
2. The fabrication of implants, prostheses and orthoses that adapt optimally to each patient.
3. The fabrication of guides and surgical tools specific to each case or in areas in which supply is insufficient.

Generally, published studies highlight the advantages of employing this technology over conventional therapeutic approaches based on a reduction in surgery time, with diminished blood loss and an optimal functional outcome.

Objectives

The aim of this project is to bring this tool closer to the medical community.

Firstly, it is important to have some basic notions on how 3D printing (3DP) works and what are the materials used on the process, as depending on the purpose for which an object is created, it is more convenient to choose a plastic material such as PLA or a metal material such as titanium.

Secondly, knowledge on 3D object digitisation software is required. It may seem necessary to have very specialised knowledge to understand and effortlessly use 3D digitisation. However, since the invention of 3D technology, a number of software facilitating the process of digital design of 3D objects (CAD) have been developed.

An easy-to-understand guide that shows how to start employing these software is the initial step in developing skill and accuracy in 3D design, so that 3D printing tools can be integrated as part of the routine diagnostic and therapeutic procedure in daily clinical practice.

Methodology

A literature search was conducted through PubMed mainly, in order to find published articles that contextualised and offered a broad view on the usage of 3DP in medicine. Subsequently, the potential benefit of 3D printing integration in hospital services that motivated the elaboration of this protocol was also justified.

Common search criteria for the different articles were: clinical practice guidelines, meta-analysis, systematic review and clinical trial on human subjects, published in the last 10 years, in English or Spanish, on 3D printing usage in medicine.

After reading and synthesis, various video tutorials offered by the General Surgery Department at CHU de Rouen (Rouen University Hospital) were consulted. In these videos, using the hospital's own cases, an explanation is given on how to create an anatomical model with 3D Slicer.

For the implementation of this protocol, a real case of hip dysplasia treated by the Orthopaedic Surgery and Traumatology Department at Castelló University General Hospital (HGUCS) was taken as example. The significant anatomical deformity of the patient's hip posed a challenge for its prosthetic reconstruction. Surgery simulation on the 3D model made it possible to experiment with placement of the prosthesis, allowing to check its size and its most suitable placement to correct the biomechanics of the dysplastic hip in order to obtain the best functional outcomes in the patient's activity.

During this process, the elaboration of the protocol was supervised by a tutor through a face-to-face and online monitoring.

Conclusions

Published evidence agrees on the benefits of 3DP in clinical practice. There are numerous articles describing the success on complex operations, not limited to orthopaedic surgery but also in other specialisations such as cardiothoracic surgery, vascular surgery, and otorhinolaryngology, among others.

The result of this project has been the elaboration of a protocol for computer-aided design (CAD) software initiation allowing practitioners to create simple, printable, digital 3D models in-house.

The software used, 3D Slicer, offer many other tools for perfecting and giving the models different attributes, which is why this protocol may constitute a starting point for its extension to other functionalities not mentioned here. In any case, it is essential that specialists interested in 3DP master the tools described in this work.

PRESENTACIÓN DEL PROTOCOLO AL SERVICIO

La prevalencia de patología de cadera está en aumento debido, en gran parte, a los cambios en el estilo de vida de una población progresivamente más longeva. El manejo quirúrgico de la misma es complicado dada la complejidad anatómica de las estructuras implicadas.

Es por ello que el éxito quirúrgico depende de una buena planificación prequirúrgica, planificación que puede beneficiarse en gran medida de la representación anatómica en 3D de la lesión específica del paciente.

Para hacer posible la incorporación de esta herramienta a la Unidad de cadera del Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del HGUCS, se ha planteado la elaboración de un protocolo asistencial que permitirá conocer e iniciarse en este proceso, y que servirá como Trabajo de Fin de Grado.

Las personas implicadas en la elaboración de este protocolo creen conveniente la presentación por escrito de dicho Trabajo de Fin de Grado a la unidad de patología de cadera del Servicio de Traumatología y Cirugía Ortopédica y posteriormente, cuando la situación epidemiológica lo permita, a la totalidad del servicio.

Celia Montón Gómez

Nuria Isabel Olmedo García

ÍNDICE

1. Índice de abreviaturas	10
2. Introducción y problema a abordar	11
3. Objetivos	13
4. Proceso de elaboración	13
I. Preguntas clínicas	13
II. Estrategia de búsqueda	14
i. Criterios de inclusión	14
ii. Términos de búsqueda	14
iii. Fuentes bibliográficas	14
5. Protocolo para la impresión de modelos 3D	16
I. Técnicas de impresión	16
II. Materiales de impresión	19
III. Proceso de impresión	21
IV. Software: 3D Slicer	24
V. Aplicaciones generales de la impresión 3D en medicina	26
i. Aplicaciones actuales en COT	29
ii. Impresión 3D en cirugía de cadera	31
VI. Caso clínico: corrección de una displasia de cadera de años de evolución.....	33
VII. Guía práctica para el diseño de modelos anatómicos 3D	39
VIII. Conclusión	51
6. Anexos	52
7. Declaración de intereses de los participantes	53
8. Agradecimientos	54
9. Bibliografía	55

1. ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
CAD	Computer aided design (Diseño asistido por computadora)
CNC machine	Computer Numerical Controlled machine
COT	Cirugía ortopédica y traumatología
DICOM	Digital Imaging and Communication On Medicine
DLP	Digital light processing (Procesamiento digital por luz)
FDM	Fused deposition modelling (Modelado por deposición fundida)
I3D	Impresión 3D
MJM	Multijet modelling (Impresión por inyección de material)
PACS	Picture Archiving and Communication System
PBF	Powder bed fusion (Fusion de lecho de polvo)
PLA	Ácido poliláctico
PMNA	Polimetilmetacrilato
PTC	Prótesis total de cadera
ROI	Region of interest (Región de interés)
RP	Rapid prototyping (Prototipo rápido)
SLA	Stereolithography (Esterolitografía)
SLS	Selective laser sintering (Sinterización selectiva por láser)
STL	Standard tessellation language (Lenguaje de resellado estándar)
TGA	Transposición de grandes arterias

2. INTRODUCCIÓN Y PROBLEMA A ABORDAR

Desde la invención de los Rayos X, el uso de la imagen para complementar el diagnóstico clínico de múltiples patologías no ha hecho más que progresar y cobrar importancia.

Un hito histórico en la medicina moderna fue la implementación de la tecnología TAC y RMN en la práctica médica habitual. Conforme se iba adquiriendo conocimiento y destreza en la interpretación de estas técnicas, nuevas inquietudes iban surgiendo sobre cómo mejorar y ganar precisión en la representación espacial de nuestra anatomía.

En 1979, se planteó la idea de usar la tecnología 3D en medicina. En ese momento, ya se disponía de herramientas para crear prototipos mediante el “milling”, es decir, mediante el tallado y fresado de un bloque macizo sólido hasta obtener una pieza compacta parecida a aquello que se pretendía imitar. Estas herramientas eran controladas por una “CNC machine” (Computer Numerical Controlled machine), que indicaba en qué medida y modo debían moverse los tornos, fresadores, y demás herramientas, alrededor del bloque para moldear su superficie.

Hoy en día, la creación de objetos 3D depende de un proceso más sofisticado basado en técnicas de “Rapid Prototyping” (RP). Se trata de un proceso de fabricación aditiva que permite la construcción de un modelo desde cero, depositando y solidificando material capa por capa.

Se utilizó por primera vez a finales de la década de 1980 y se desarrolló para integrar la fabricación de objetos con la precisión y funcionalidad del diseño asistido por computadora (CAD). Es decir, con esta tecnología se podía producir de forma rápida prototipos que representan con gran precisión un borrador diseñado mediante programas informáticos.

Hasta 1987, momento en el que se introdujo la primera máquina de impresión comercial 3D, el acceso a esta tecnología había estado restringido a grandes industrias. No obstante, desde entonces se han ido desarrollando impresoras más sencillas y asequibles para aficionados o pequeñas empresas, de modo que por un coste menor (1), es posible llevar el CAD original a la práctica clínica habitual, y utilizarse en la planificación quirúrgica o la enseñanza médica (2).

La técnica de impresión 3D (I3D) puede proporcionar un modelo de casi cualquier forma a partir de imágenes digitales 3D u otra fuente de datos electrónicos (2), obteniéndose modelos anatómicos muy precisos, como ocurre con los modelos de hueso impresos en 3D (3), incluso cuando se trata de fracturas óseas.

Dentro del servicio de COT, el uso de la tecnología de impresión 3D es cada vez más frecuente. Generalmente se emplea en docencia, planificación preoperatoria, asesoramiento especializado de pacientes mediante el uso de modelos 3D individuales, obtención de herramientas o guías quirúrgicas no implantables (guías de sierra intraoperatorias), y fabricación de ortesis y prótesis (4).

La impresión 3D racionaliza la planificación 3D virtual al permitir a los cirujanos sentir táctilmente modelos de tamaño real donde la escala, forma y anatomía se aprecian de manera más efectiva y los fragmentos óseos están bien representados. Además, los modelos fabricados con materiales que cumplen con los estándares de biocompatibilidad (p.ej.: ISO-10993) pueden esterilizarse siguiendo protocolos predefinidos (5) y llevarse al campo quirúrgico.

El RP y la impresión 3D, en el sector clínico, requieren un equipo multidisciplinar, puesto que es necesario una primera base de conocimiento y dominio de habilidades técnicas e informáticas para generar los formatos de archivo reconocidos por las impresoras 3D.

Por tanto, la tecnología 3D es una gran herramienta de trabajo, pero es necesario estar familiarizado con las técnicas involucradas en la impresión 3D. Es por ello que, en la mayoría de ocasiones, se hace necesario instruir a los profesionales en estos aspectos.

En cuanto a la **población meta** a la que va dirigido este protocolo, engloba, en un primer lugar, a pacientes con lesiones complejas de cadera, pertenecientes al departamento de salud de Castellón cuyo hospital de referencia es el HGUCS, que requieran una intervención quirúrgica para su tratamiento. Así mismo, este mismo protocolo podrá aplicarse a la planificación de otras lesiones complejas dentro de la especialidad de COT y que puedan beneficiarse de estos modelos impresos. Finalmente, al tratarse de programas informáticos no creados específicamente para su empleo en COT, estas mismas herramientas podrán ser implementadas por otros profesionales de diferentes especialidades.

De este modo, los **usuarios meta** de este documento son principalmente los especialistas pertenecientes al Servicio de Cirugía Ortopédica y Traumatología del Hospital General Universitario de Castellón, ampliando este grupo al resto de especialistas que puedan mejorar su práctica clínica con el empleo de la tecnología 3D.

3. OBJETIVOS

La elaboración de este trabajo pretende responder a los objetivos planteados a continuación.

I. OBJETIVOS GENERALES

- Establecer un protocolo que permita y facilite el proceso de diseño de modelos anatómicos u otros objetos de utilidad médica mediante programas informáticos de diseño asistido (CAD).
- Presentar al usuario las características de la impresión 3D en el ámbito sanitario.
- Describir la presencia de la tecnología de impresión 3D en el ámbito sanitario.

II. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los pasos a seguir dentro del programa informático hasta llegar a la obtención del objeto 3D.

4. PROCESO DE ELABORACIÓN

I. PREGUNTAS CLÍNICAS

Con el fin de realizar una búsqueda bibliográfica orientada a cumplir los objetivos previamente expuestos, se plantearon las siguientes preguntas clínicas:

- ¿En qué consiste la tecnología 3D?
- ¿Qué métodos y materiales de impresión hay disponibles?
- ¿Qué métodos y materiales de impresión son los más adecuados para la fabricación de objetos de utilidad médica, como prótesis, implantes o material quirúrgico?
- ¿Qué programas de diseño 3D existen y se utilizan en el ámbito sanitario?
- ¿Qué evidencia hay publicada sobre la impresión 3D en la práctica clínica?
- ¿Qué tipo de intervenciones se han beneficiado de una planificación prequirúrgica con modelos anatómicos obtenidos mediante impresión 3D?
- ¿Qué se ha tenido en cuenta para determinar el beneficio de la impresión 3D en relación con los procesos convencionales diagnósticos y terapéuticos?
- ¿Cuál es la situación de la impresión de modelos 3D en la especialidad de COT?

II. ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

La búsqueda bibliográfica se ha realizado, principalmente, con el objetivo de completar el apartado *Aplicaciones generales de la impresión 3D en medicina*.

Los apartados técnicos referentes a *métodos y materiales* han sido elaborados a partir de páginas web de instituciones y empresas dedicadas a la impresión 3D, como IEBS, HXX, Tresdpro o ALL3DP.

El *proceso de diseño del modelo 3D con 3D Slicer* ha estado guiado por las tutoras del TFG y apoyado en diferentes videotutoriales grabados por el servicio de cirugía general del CHU de Rouen (Centro hospitalario universitario de Rouen, Francia).

i. Criterios de inclusión

Se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica entre noviembre de 2020 y febrero de 2021. Los criterios de inclusión comunes a todas las búsquedas realizadas en las distintas fuentes bibliográficas son:

- Guías de práctica clínica, metaanálisis y revisiones sistemáticas sobre el empleo de la impresión 3D en medicina en sujetos humanos, centrando la búsqueda en el tratamiento de patología de cadera.
- Publicaciones en los últimos 10 años.
- Texto completo de acceso libre, publicado en inglés o español.
- Texto de acceso privado a través de instituciones, entre las cuales se encuentra la UJI

Aquellas publicaciones que no cumplían con los criterios anteriormente expuestos no fueron seleccionadas.

ii. Términos de búsqueda

Los términos utilizados para las búsquedas en las diferentes plataformas han sido: “3D printing”, “3D model”, “3D technology”, “3D pelvis”, “Hip surgery”, “Hip pathology”, “3D anatomic model”, “3D preoperative planning”, “Acetabular fracture”, “Fracture treatment”.

iii. Fuentes bibliográficas

La búsqueda bibliográfica se ha realizado a través de la plataforma PubMed, desde la cual se ha accedido a diferentes revistas (RadioGraphics), organizaciones médicas (SECOT), y bibliotecas (ATM), entre otros.

Los artículos correspondientes a las entradas (1), (2), (3), (4) y (5) fueron proporcionados por la tutora del TFG.

Términos empleados	Filtros	Resultados	Seleccionados	Bibliografía
(3D technology)	Ensayo clínico; publicado en los últimos 10 años; humanos; Inglés; español	96	1	12

Términos empleados	Filtros	Resultados	Seleccionados	Bibliografía
((3D printing) AND (External fixation)) OR (Internal fixation)	Ensayo clínico; metaanálisis; revisión sistemática; publicado en los últimos 5 años; humanos; Inglés; español	169	1	13

Términos empleados	Filtros	Resultados	Seleccionados	Bibliografía
((3D printing) AND (hip surgery)) AND (3D model)	Ensayo clínico; metaanálisis; revisión sistemática; publicado en los últimos 10 años; humanos; Inglés; español	2	1	27

Realizando varias combinaciones de términos, la búsqueda era muy específica y eran pocos los artículos mostrados. Gran parte de ellos han sido seleccionados desde la bibliografía de otros artículos, por similitud de términos y tópicos tratados; todos ellos cumplían los criterios de inclusión previamente expuestos.

5. PROTOCOLO PARA LA IMPRESIÓN DE MODELOS 3D

I. TÉCNICAS DE IMPRESIÓN 3D (6) (7) (8)

La impresión 3D, actualmente, se sirve de diversos métodos a la hora de crear un objeto. Las diferencias entre ellos radican principalmente en la forma en la que se construyen y utilizan las diferentes capas que conforman el modelo.

A grosso modo, entre los métodos más utilizados cabe destacar:

- ♦ **Impresión por inyección de material o Multijet modelling (MJM):** el proceso consiste en la inyección de un fotopolímero a través de un cabezal de impresión, que a su vez contiene una fuente de luz UV que permite endurecer este fotopolímero a medida que es inyectado sobre el material de soporte (habitualmente, de cera). Tiene la ventaja de poder imprimir utilizando diferentes materias y mezclas de ellas, por lo que se elimina la necesidad de diseñar e imprimir cada parte por separado en sus respectivos materiales y realizar el montaje después de la impresión, reduciendo así el tiempo de producción.
- ♦ **Modelado por deposición fundida o Fused deposition modelling (FDM):** el material, un termoplástico a modo de filamento (de entre 1.75mm y 3 mm de diámetro usualmente), se funde a altas temperaturas y emerge fundido por la boquilla o extrusor. A temperatura ambiente, se endurece rápidamente para fijarse sobre la capa anterior. El FDM es la técnica de impresión 3D por adición más difundida entre el público general, ya que es el método utilizado por la mayoría de impresoras de escritorio.

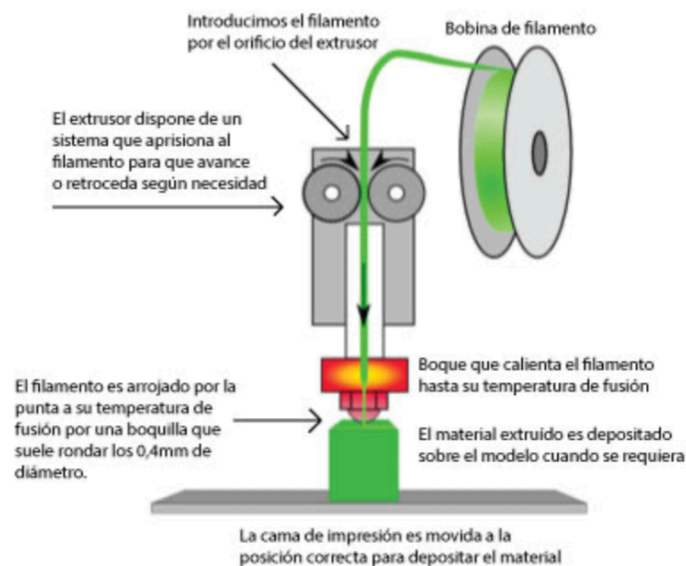


Fig. 1. Técnica de impresión por FDM

- ♦ **Fotopolimerización:** es la tecnología de impresión 3D por adición más antigua que existe. En esencia, consiste en endurecer selectivamente capa a capa un fotopolímero líquido dispuesto en una cubeta. La polimerización se produce cuando un haz de luz de cierta longitud de onda incide sobre el material. De esta manera, el polímero se endurece a medida que la placa de montaje se va moviendo hacia abajo muy poco a poco para ir

creando las distintas capas. Existen dos procesos que emplean esta tecnología: stereolithography o estereolitografía (**SLA**) y el digital light processing o procesamiento digital por luz (DLP).

- **SLA:** en este proceso un haz de luz UV polimeriza generalmente resinas plásticas. Los rayos de luz dibujan un patrón en la superficie del líquido capa a capa, de modo que solo se endurece el material que forma parte de ese patrón y sobre el que ha incidido la luz. Una vez endurecida la primera capa, la plataforma de elevación del equipo desciende una distancia equivalente al grosor de una capa de resina solidificada y se barre la pieza dejando una nueva capa de resina líquida en la superficie de la cubeta, preparada para la siguiente impresión del láser ultravioleta. De esta forma se va creando, capa a capa, la pieza tridimensional. Una vez que la impresión se ha completado, la pieza se sumerge en un baño químico para retirar el exceso de resina y, posteriormente, se cura en un horno de luz ultravioleta. En esta técnica es necesario imprimir sobre estructuras de sujeción para evitar la deflexión de la pieza por gravedad y el deslizamiento de la pieza cuando pasa la hoja de re-aplicación de resina. Estos soportes deben ser retirados del modelo final de forma manual. La SLA fue la primera técnica de impresión 3D disponible y la primera utilizada en el campo biomédico, en 1994.

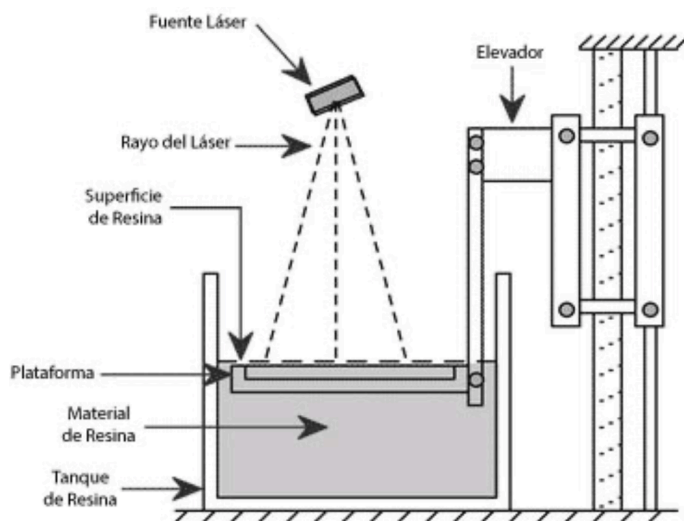


Fig. 2. Técnica de impresión por SLA

La fotopolimerización es la técnica estrella para el RP, por la alta precisión y resolución posible, y los buenos acabados superficiales. Gracias a esta gran resolución de impresión, permite imprimir piezas de gran complejidad geométrica.

- ◆ **Fusión de lecho de polvo (Powder Bed Fusion, PBF):** consiste en extender capas de polvo del material con el que se desea construir, sobre las cuales se aplica una fuente de energía térmica que funde el polvo según la forma programada, capa a capa, hasta formar el objeto deseado. Existen 5 procesos que usan la tecnología de fusión de lecho de polvo, muy parecidos todos ellos, a destacar la sinterización selectiva por láser (Selective laser sintering, **SLS**)

- **Sinterización selectiva por láser (SLS):** se trata de una técnica que permite el empleo de un amplio rango de materiales, como polímeros de nailon (puro, con

fibras de vidrio u otras), poliestireno, e incluso metales como el acero, titanio, aleaciones y otros. Estos materiales se calientan mediante la energía procedente de un láser de CO₂ de alta potencia, justo por debajo de su punto de ebullición (proceso de sinterización), hasta que el polvo se convierte en una estructura sólida. Otra característica del SLS es que no necesita estructuras adicionales para sostener el objeto mientras se está imprimiendo; cuando el objeto está completamente formado, se deja enfriar en la máquina antes de ser retirado. El acabado rugoso puede suponer un inconveniente, pero mediante un postprocesado se limpia la pieza y se suaviza la superficie.

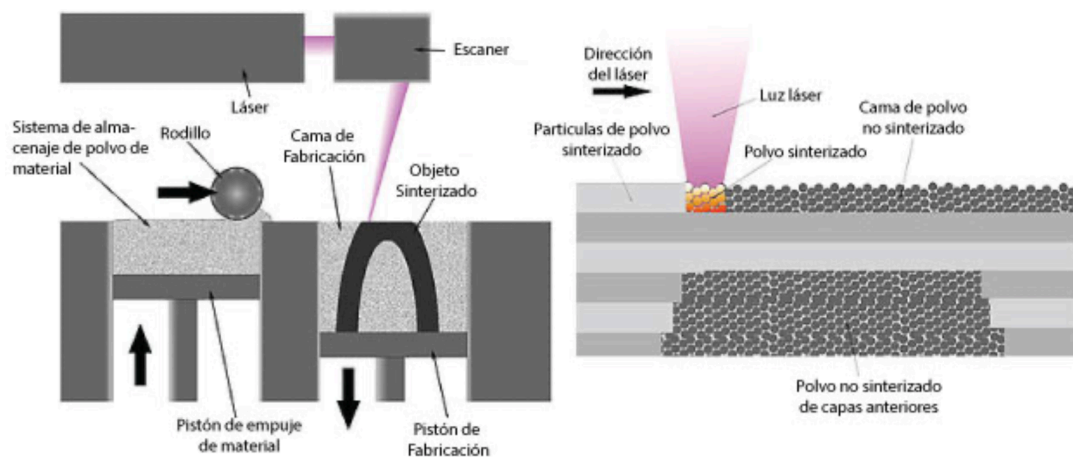


Fig. 3. Técnica de impresión por SLS

Se trata de un método idóneo para producir piezas duraderas y funcionales, con una amplia variedad de aplicaciones. Muy utilizado en la industria aeroespacial y automotriz y con creciente aplicación en la **industria médica** para la obtención de utillaje médico (tooling), impresión de modelos para la práctica de operaciones o la impresión de ciertas partes óseas para su implantación en el paciente.

Tecnología de impresión	Descripción	Resolución en los 3 ejes (mm)	Superficie del modelo	Ventajas	Desventajas
Extrusión de material FDM	Los termoplásticos derretidos son extruidos a través de una boquilla sobre una plataforma	Z: 0.1-0.5 X/Y: 0.1-0.4	Muy rugosa	<ul style="list-style-type: none"> Bajo coste Materiales resistentes Los modelos pueden ser impresos con varios materiales, lo que hace posible obtener un modelo con colores y características físicas diferentes (más flexible o más rígido) 	<ul style="list-style-type: none"> Producción lenta Baja resolución espacial en comparación con otras técnicas Los modelos pueden ser permeables a líquidos debido a imperfecciones en la adhesión de las capas.
Inyección de material (MJ)	Las gotas de un fotopolímero líquido (epóxido o acrílico) se inyectan sobre una bandeja y se polimerizan y solidifican mediante exposición a la luz ultravioleta.	Z: 0.3 X/Y: 0.05	Ligeramente rugosa	<ul style="list-style-type: none"> Versátil para modelos anatómicos: pueden contener diferentes materiales con colores y propiedades variadas. Disponibles materiales biocompatibles a corto plazo, útiles para guías y herramientas quirúrgicas 	<ul style="list-style-type: none"> Alto coste Proceso lento
SLA (estereolitografía)	El fotopolímero contenido en una cubeta se polimeriza mediante un láser UV por iluminación de la superficie superior o inferior del líquido.	Z: 0.02-0.20 X/Y: 0.075-0.2	Lisa	<ul style="list-style-type: none"> Ideal para modelos vasculares huecos (las porciones huecas se pueden imprimir sin material de soporte dependiendo de la orientación) Materiales biocompatibles disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> Difícil retirada de los soportes Solo se admite un tipo de material para cada modelo
PBD: SLS (Sinterización selectiva por láser)	Polvo de plástico, metal, cerámica o hierba se sinteriza mediante un láser de alta potencia	Z: 0.1-0.20 X/Y: 0.075-0.2	Rugosa	<ul style="list-style-type: none"> Los materiales incluyen metales implantables (ej.: titanio, cobalto-cromo) o polímeros sintéticos (ej.: nailon) No se requieren soportes 	<ul style="list-style-type: none"> Alto coste Los modelos necesitan un procesamiento posterior muy mecanizado (como el pulido)

Tabla 1. Métodos de impresión 3D comúnmente utilizados en medicina

II. MATERIALES DE IMPRESIÓN

(1) (2) (3)

Las aplicaciones y características de los objetos obtenidos mediante tecnología 3D vienen determinadas en gran medida por el material empleado, y esta decisión viene influenciada por el tipo de impresión por el que se opta al crear una pieza 3D. A continuación, se presentan algunos de los materiales más populares en este campo.

Tipo	Tecnologías	Materiales
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos (por ejemplo PLA, ABS), HDPE, metales eutécticos, materiales comestibles...
Hilado	Fabricación por haz de electrones (EBF3)	Casi cualquier aleación
Granulado	Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)	Casi cualquier aleación
	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleaciones de titanio
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección aglutinante (DSPC)	Yeso
Laminado	Laminado de capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Fotoquímicos	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímero
	Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC)	Fotopolímero

Fig. 4. Materiales más empleados según tipo y tecnología de impresión

- ♦ **Ácido poliláctico (PLA):** uno de los materiales termoplásticos más populares, empleado habitualmente por las impresoras de escritorio con tecnología de extrusión (FDM). Es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico, fabricado a partir de recursos renovables al 100%, como el maíz y otros productos ricos en almidón. En su forma natural, es un polímero incoloro y resistente a la humedad y a la grasa. En cuanto a propiedades físicas, químicas y mecánicas, la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad del PLA son comparables a los del polietileno; sin embargo, es más hidrofílico, ya que tiene una densidad más baja. Este polímero tiende a ser estable a la luz ultravioleta dando como resultado objetos con poca decoloración. Además, es un material ignífugo y de baja generación de humos.

El PLA puede formularse para ser rígido o flexible, copolimerizarse con otros materiales y, dependiendo del proceso de fabricación al que se someta, puede adquirir diversas características mecánicas.

En la industria médica, el PLA viene siendo utilizado desde hace años, habiéndose convertido en un material esencial. Al ser biodegradable y bioabsorbible, es un material ideal para implantes en hueso y otros tejidos (en cirugía ortopédica, oftalmología, ortodoncia o para el lanzamiento controlado de medicamentos contra el cáncer), y para suturas (cirugía del ojo, y del tórax y abdomen, entre otras).

- ♦ **Resinas fotopoliméricas:** junto con los termoplásticos, son otros de los materiales más empleados en la impresión 3D. Aplicables tanto en tecnología SLA como en el MJM, son materiales cuya base es un polímero orgánico sensible a la luz de una determinada longitud de onda. Cada fabricante desarrolla sus propias resinas patentando la formulación, por lo que las propiedades físicas y mecánicas pueden variar de forma considerable entre distintos fabricantes.
- ♦ **Metales en polvo:** la impresión 3D en metal es una de las grandes ventajas de la fabricación aditiva. Las tecnologías que usan la fusión de lecho de polvo (PBD), como la sinterización selectiva por láser (SLS) y la fusión selectiva por láser (SLM) utilizan, entre otros materiales, diferentes aleaciones metálicas:
 - Polvo de titanio. Muy fácil de mecanizar y con excelentes propiedades físico-mecánicas. Se utiliza frecuentemente en prototipos o piezas finales como implantes y prótesis.
 - Cromo cobalto. Por la dureza del material y los acabados “espejo” finos de gran calidad, es utilizado para la fabricación de moldes de utillaje de piezas plásticas, Además, típicamente, el CoCr se utiliza en implantes ortopédicos y dentales.

III. PROCESO DE IMPRESIÓN

La impresión tridimensional en medicina incluye la fabricación de modelos anatómicos representados en las imágenes DICOM. Sin embargo, las impresoras 3D no trabajan con este formato DICOM, sino que entienden objetos individuales, o partes de ellos, definidos por superficies definitorias de una región del espacio.

Un formato de archivo estándar para definir estas superficies es el “Lenguaje de Teselado estándar” (**STL**). El formato STL codifica la superficie como un conjunto de triángulos (facetas) que encajan unos con otros como un rompecabezas.

Desde la creación de este formato, otros nuevos, como el Additive Manufacturing File (AMF) se han ido desarrollando con el objetivo de superar algunas de las limitaciones del formato STL original, de manera que se permita incorporar características de color, textura y propiedades del material en cada parte de la superficie (9).

Por tanto, para producir un modelo impreso en 3D, en primer lugar se debe definir digitalmente el objeto de interés, acotando las estructuras en las imágenes DICOM según sea su tejido (definido por las unidades de densidad en secuencias T1 o T2) o fisiopatología (definida en otros tipos de estudios más complejos, como el Flair). Estos objetos, una vez transformados a formato STL u otro de los formatos compatibles, se podrían imprimir en 3D.

Conceptualmente dividimos el proceso de fabricación de modelos 3D en tres fases: adquisición de imágenes, postprocesamiento de imágenes e impresión 3D.

A) Adquisición de imágenes

En principio, un modelo médico 3D se puede imprimir a partir de cualquier conjunto de datos de imágenes volumétricas que tenga suficiente contraste para diferenciar los tejidos.

Clásicamente, la técnica de imagen de elección a partir de cuyas imágenes se creará el modelo 3D es el TAC, ya que además de un amplio espectro de aplicaciones, el post-procesamiento de las imágenes es relativamente sencillo.

El alto contraste, la relación señal-ruido y la resolución espacial mejoran la diferenciación de estructuras y minimizan los efectos de volumen parcial que podrían limitar la impresión 3D.

Idealmente, las secciones de la imagen deben reconstruirse con vóxeles isotrópicos de no más de 1,25 mm, ya que secciones más gruesas comprometen la precisión del modelo (6). Por otro lado, secciones muy delgadas (p.ej. <0.25 mm) requieren una segmentación extensa y un refinamiento más detallado del STL, particularmente en presencia de artefactos de imagen.

Cuando rescatas un estudio de imagen y lo guardas, el formato que obtienes es DICOM. La conversión a STL se hará desde las aplicaciones de procesamiento y edición del modelo digital.

B) Post-procesamiento de imágenes

El post-procesamiento engloba todas las acciones para obtener una correcta visualización de los datos volumétricos en cualquier plano y luego representar ese volumen en una pantalla 2D.

Este paso del proceso resulta importantísimo, ya que modelos inexactos pueden resultar en una planificación inadecuada del abordaje quirúrgico y tratamiento del paciente (10).

Es necesario reconocer y estudiar los factores que afectan a la precisión y reproducibilidad para establecer protocolos de trabajo en cuanto al proceso de creación de estos modelos impresos en 3D. Al tratarse de un proceso con numerosos pasos intermedios, en cada uno de ellos se pueden introducir errores y distorsiones importantes anatómicos o geométricos. (6).

La manipulación de imágenes DICOM para la impresión 3D implica la segmentación precisa de los tejidos deseados mediante la delimitación de regiones de interés ("Regions of interest, **ROI**") y su posterior refinado para crear el objeto, en formato STL, según el conjunto de superficies definidas por esos ROI. Este paso de perfeccionamiento resulta nuevo para los médicos especialistas y generalmente requiere software y habilidades que se utilizan principalmente en aplicaciones de ingeniería (9).

Además, el modelo STL final debe ser revisado cuidadosamente, ya que fallos en la precisión conducen a errores en el modelo final, que podría no ajustarse con la anatomía real del paciente.

La segmentación de las ROI puede ser tanto automatizada (mediante herramientas que ofrecen los propios softwares, como el establecimiento de umbrales o la detección de bordes, entre otras) así como manual.

Aunque el umbral ("Thresholding") habitualmente es suficiente para la segmentación ósea por TAC (debido a la notable diferencia de unidades Hounsfield entre tejidos circundantes), para la obtención de un buen modelo digital generalmente se necesitan algoritmos más complejos, tales como el ajuste dinámico del rango de umbral.

Por otro lado, la "envoltura" de una región segmentada también se puede utilizar para generar un modelo sólido llenando verdaderos vacíos anatómicos, como ocurre con los vacíos del hueso esponjoso.

El crecimiento de la región ("región growing") es un segundo paso útil para determinar si los vóxeles segmentados pertenecen a una o a diferentes partes que se van a imprimir en 3D. El crecimiento de la región normalmente reduce la carga del último paso del proceso, que es la edición manual de las ROI 3D que rodean a los vóxeles segmentados ("esculpir"). Esto incluye manipular manualmente los límites de la ROI y borrar, combinar y modificar partes manualmente.

Después de la segmentación, la mayoría de los paquetes de software generan un modelo STL 3D imprimible de las superficies seleccionadas en base a algoritmos que preservan las características anatómicas, como la interpolación y el reconocimiento de patrones.

La forma más fácil de comprender este paso es la siguiente: se seleccionan vóxeles que encierran una superficie 3D, y se convierte su superficie a STL, pudiéndose utilizar cualquier número de facetas triangulares para adaptarse a estas superficies. Muy pocos triángulos comprometerán las características anatómicas en el modelo impreso en 3D, mientras que demasiados darán lugar a una rugosidad innecesaria en el objeto, si la superficie segmentada no es lisa. En la mayoría de escenarios clínicos comunes, los modelos basados en STL no tienen ningún beneficio una vez superan un umbral determinado de triángulos (6), (10).

Las discrepancias entre el modelo digital segmentado y el modelo impreso en 3D son generalmente del orden del tamaño de un vóxel de imagen (<1 mm [típicamente $<0,4$ mm] y $<3\%$ [típicamente $<1\%$]) y generalmente son clínicamente despreciable (9).

Aunque la mayoría de los paquetes de software pueden guardar la segmentación, procesar superficies segmentadas y exportarlas como un archivo STL, la conversión a STL desde una imagen DICOM a menudo no es óptima. Por ejemplo, una angiografía por TC de arteria segmentada como ROI transversales consecutivas define una superficie para la representación del volumen. Sin embargo, no se puede imprimir porque ese volumen que estamos midiendo está definido por el vaso que lo contiene. Para un impresora 3D, esta superficie ROI no tendrá ningún significado físico. El "cierre" es un ejemplo de un refinamiento de STL necesario para la impresión 3D de muchas estructuras.

Otras manipulaciones incluyen corregir errores como agujeros (p.ej., espacios entre facetas triangulares), invertir superficies (definir lo que está dentro y fuera de la pieza a imprimir) o aplicar suavizado local y/o global. En este paso, se realiza el diseño de piezas adicionales (p.ej., diseñar implantes o agregar soportes para sujetar partes del modelo).

El software para la manipulación de piezas en 3D, comúnmente conocido como software de diseño asistido por computadora (CAD), y la experiencia del operador son esenciales para una impresión 3D precisa. Aunque el personal, debidamente capacitado puede realizar muchos pasos, en ocasiones, los ajustes realizados por los radiólogos son esenciales para garantizar que el modelo sea clínicamente útil.

Cuando se completan los ajustes, los datos pueden transferirse a una impresora 3D para la obtención del modelo físico.

C) Impresión

Todas las impresoras 3D utilizan los datos almacenados en formato STL para ir añadiendo una capa 2D sobre otra hasta obtener el objeto 3D. El método de impresión y los materiales empleados están descritos en el apartado 4.I y 4.II.

IV. SOFTWARE: 3D SLICER

Como ya se ha descrito, trabajar con software especializado en este post-procesamiento es esencial para la impresión, puesto que la impresora necesita tener un modelo digital preciso a imitar. Existen varios programas informáticos de CAD para el procesamiento de las imágenes, siendo algunos de ellos 3D Slicer, OsiriX, MeshMixer o Blender.

En el Hospital General Universitario de Castellón, y concretamente en el servicio de COT, se emplean el 3D Slicer y, ocasionalmente, el MeshMixer, por lo que principalmente se abordará el funcionamiento y utilización del 3D Slicer, programa con el cuál se ha desarrollado el caso clínico que se abordará más adelante.

Los programas informáticos de procesado 3D admiten el formato más ampliamente aceptado en cuanto a almacenamiento de imágenes médicas: DICOM. De esta forma, se permite el intercambio de datos con sistemas clínicos como escáneres, estaciones de trabajo y servidores PACS.

A grandes rasgos, 3D Slicer es una aplicación integral que se puede utilizar para diversas tareas relacionadas con la exploración tanto cualitativa como cuantitativa de los datos de imágenes médicas multimodales, recibidos directamente del equipo de imágenes o del PACS clínico. Las tareas admitidas incluyen superposición y fusión de imágenes, anotación y medición cuantitativa de las dimensiones y volúmenes de las lesiones, filtrado y preprocesamiento de imágenes, registro automatizado de imágenes y segmentación de las estructuras individuales.

Como herramienta de investigación clínica, 3D Slicer es similar a una estación de trabajo de radiología que admite visualizaciones versátiles, pero además proporciona una funcionalidad avanzada como la segmentación y el registro automatizados para una variedad de dominios de aplicaciones.

En comparación con otras herramientas que proporcionan funciones similares, 3D Slicer es completamente de código abierto y se puede ampliar y redistribuir fácilmente. Además, 3D Slicer está diseñado para facilitar el desarrollo de nuevas funciones en forma de extensiones 3D Slicer.

El uso de una herramienta de análisis de imágenes en un entorno de investigación clínica plantea ciertos requisitos. Comúnmente se requiere el soporte del estándar DICOM para comunicar datos de imágenes, ya que es una interfaz gráfica de usuario fácilmente manejable también por operadores no técnicos. 3D Slicer permite cargar imágenes en formato DICOM desde un disco de memoria o directamente desde el PACS.

Las herramientas de análisis de imágenes implementadas como módulos de procesamiento Slicer se pueden desarrollar de tal manera que sea posible la ejecución interactiva y por lotes. Esto es particularmente valioso en situaciones en las que el procesado deba realizarse en un gran número de casos o cuando ciertos parámetros del algoritmo deban optimizarse.

La jerarquía y organización de 3D Slicer puede parecer compleja, pero esencialmente se basa en el núcleo de la propia aplicación, los módulos Slicer y las extensiones Slicer. El **núcleo** implementa la interfaz de usuario de Slicer, proporciona soporte para la entrada y salida de datos, y para la visualización y desarrollo de interfaces que admitirán la extensión de la aplicación con nuevos complementos.

Estos complementos se denominan **módulos Slicer** y dependen del núcleo Slicer para implementar nuevas funciones. A su vez, los módulos pueden ser independientes o pueden depender de otros módulos (por ejemplo, un módulo que proporciona la funcionalidad de segmentación de lesiones puede depender del módulo de representación de volumen para permitir la visualización 3D de la anatomía y la estructura segmentada).

A diferencia de los módulos de Slicer que se empaquetan como parte de la distribución de Slicer, las **extensiones** de Slicer son complementos externos instalados "a pedido" por el usuario. Las extensiones proporcionan una vía para integrar nuevas funcionalidades.

Por tanto, 3D-Slicer sigue un paradigma modular a la hora de ejercer funciones específicas. Cada módulo es una unidad funcional con todas las herramientas necesarias para cumplir una de estas tareas específicas. Los módulos se agrupan según la funcionalidad que proporcionan y el operador puede seleccionar cuál activa utilizando la GUI principal de Slicer, donde se expondrán los controles del módulo seleccionado.

Prácticamente todo el procesamiento realizado por los módulos individuales en Slicer está en el contexto de datos volumétricos 3D. Por esta misma razón, puede que las herramientas Slicer genéricas no sean adecuadas para procesar datos no volumétricos como video endoscópico, ultrasonido manual o radiografías convencionales, aunque se han desarrollado herramientas personalizadas basadas en Slicer para algunas de estas tareas.

Los módulos centrales de Slicer permiten la compatibilidad con DICOM (módulo "DICOM"), la representación de volumen (módulo "Representación de volumen") y la manipulación de transformaciones espaciales para el registro manual (módulo "Transformaciones"). Otros módulos incluyen:

- Filtrado
- Segmentación: herramientas que separan subregiones individuales en el conjunto de datos en función de determinadas características (como la intensidad de señal). El módulo Editor contiene una colección de herramientas para la segmentación manual y semiautomática.
- Modelos de superficie
- Difusión
- Terapia guiada por imágenes

Esta colección de módulos está continuamente en expansión conforme los módulos van mejorando desde las versiones anteriores del software y a medida que la comunidad aporta nuevas funcionalidades.

V. APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA 3D EN MEDICINA

Desde la invención de la impresión 3D, se ha ido incluyendo esta tecnología de forma progresiva en la práctica médica habitual. Actualmente, son numerosas las aplicaciones de la impresión 3D en nuestro medio, pero básicamente se pueden englobar en tres grandes grupos: 1. Creación de modelos anatómicos, 2. Fabricación de implantes, prótesis, férulas y fijadores externos y 3. Obtención de instrumentación y guías quirúrgicas.

Según la evidencia publicada respecto a un uso u otro, se puede concluir que la aplicación más extendida hoy en día es la fabricación de guías quirúrgicas y modelos anatómicos (11) (12).

La utilidad de los modelos anatómicos radica, por una parte, en los beneficios de planificar una intervención quirúrgica sobre un modelo anatómico específico del paciente con antelación, y por otra, en la posibilidad de mejorar la educación de estudiantes y residentes especialistas. En ambos supuestos, la evidencia publicada demuestra que la tecnología 3D es de gran utilidad (14).

o Modelos anatómicos

Los biomodelos o biorréplicas 3D son reproducciones físicas de un órgano o región anatómica concreta del paciente. Por medio de la I3D (impresión 3D) se puede fabricar cualquier región anatómica visualizada en una prueba de imagen médica, a escala real, en diversos materiales, y con una exactitud milimétrica en función de la calidad de la imagen y la tecnología elegida. Las técnicas de imagen más empleadas son la tomografía computarizada (TAC) y la resonancia magnética.

Los biomodelos 3D se pueden utilizar en la planificación avanzada de intervenciones quirúrgicas. Esto permite que el cirujano pueda tomar decisiones y simular el procedimiento con anterioridad al acto quirúrgico e incluso fabricar y testar las herramientas quirúrgicas y prótesis que se contempla que serán necesarias durante la intervención. Además, facilita la comunicación y el entendimiento con el paciente (14): los modelos constituyen una herramienta educativa para el propio paciente. En varios estudios se ha visto que conocer la propia anatomía y proceso patológico incrementa la confianza con el médico y satisfacción con el resultado obtenido.

Otra de las ventajas de los biomodelos 3D es que permite innovar y mejorar la educación médica de residentes y especialistas.

En esta línea, existen publicaciones que concluyen que los cirujanos residentes que habían preparado la operación con antelación sobre un modelo anatómico obtuvieron resultados más satisfactorios en términos de tiempo de cirugía, pérdida sanguínea durante la misma y resultado funcional post-operatorio, en comparación con sus compañeros cuya planificación quirúrgica se realizó en base a imágenes médicas 2D (TAC o RNM) (11).

Además de la fabricación de modelos anatómicos de gran detalle y realismo, es posible fabricar, a un coste muy reducido, simuladores de técnicas médicas como intubaciones orotraqueales, suturas, endoscopias, intervenciones endovasculares o quirúrgicas, entre otras. Además, es una alternativa al uso de cadáveres para la enseñanza universitaria de asignaturas médicas, como anatomía (14).

Son muchas las especialidades que se han beneficiado hasta el momento de los modelos anatómicos 3D. Para poder comparar los resultados de la utilización de estos modelos con las técnicas convencionales para la planificación quirúrgica se han determinado en la mayoría de artículos publicados hasta el momento las siguientes variables: tiempo de cirugía, pérdida sanguínea, exposición a radiaciones ionizantes, resultados médicos y relación coste-efectividad, aunque no en todos los artículos se estudiasen todas estas variables conjuntamente (12).

A continuación, se presenta una breve recopilación de algunas de las especialidades en las que se ha incluido la tecnología 3D y en qué procedimientos se ha aplicado principalmente.

En el campo de la neurocirugía, se han realizado representaciones de la base del cráneo, así como de deformidades articulares craneovertebrales, aportando un mejor conocimiento de la anatomía de estas regiones complejas para conseguir un abordaje quirúrgico más dirigido. También se ha aplicado en cirugías correctoras en escoliosis vertebrales y resección de neoplasias. Por último, también se ha conseguido modelar catéteres específicos para reparaciones de aneurisma.

En cirugía vascular, se han podido obtener representaciones de placas intravasculares calcificadas, de aneurismas y de variantes anatómicas aberrantes, llegando incluso a producir modelos 3D para, una vez esterilizados, emplearlos intraoperatoriamente a modo de orientador anatómico.

En relación con anomalías anatómicas, recientemente se ha publicado el primer caso de divertículo de Kommerell en el que se imprimió el modelo 3D para ayudar en la toma de decisiones, planificación y seguridad de la ejecución de una posible cirugía cardiaca (15).

Diversos estudios han confirmado la precisión de modelos impresos 3D en la replicación de anatomía y patología cardiaca compleja y el valor clínico de los mismos en el manejo de pacientes con defectos cardiacos congénitos (16). En cirugía cardiorádica, se han realizado correcciones de defectos como la TGA, estenosis pulmonar o defectos del septo ventricular tras la planificación con modelos anatómicos. También se ha conseguido perfeccionar el abordaje para resecciones de tumores cardiacos, subsegmentectomías pulmonares y para el tratamiento de patología esofágica compleja.

Un uso novedoso se puede observar en cirugía hepatobiliar, donde se han empleado estos modelos para detectar tumores que puedan pasar desapercibidos para la ECO por su tamaño o localización.

Cabe mencionar que una de las especialidades donde más aplicaciones ha tenido la tecnología 3D es cirugía oral y maxilofacial. La complejidad de las estructuras craneales dota de gran interés a los modelos anatómicos de las mismas. Las reconstrucciones maxilares, diseño de colgajos y corrección de defectos tienden a ofrecer mejores resultados finales tras la planificación con modelos anatómicos. Además, sobre estos modelos es más fácil fabricar y moldear implantes de titanio y los soportes necesarios para las reconstrucciones, que terminan por ofrecer mejores resultados médicos (12).

Por último, en otorrinolaringología se han creado modelos de hueso temporal o de cartílago cricoides en los que se puede testar la probabilidad de fractura previo a intervenciones con balón dilatador.

Aunque los modelos anatómicos pueden emplearse de forma aislada, se ha observado una tendencia a combinar estos modelos con guías quirúrgicas también obtenidas mediante esta tecnología.

○ Fabricación de implantes, prótesis, férulas y fijadores

En cuanto a la fabricación de implantes, prótesis, férulas y fijadores externos, la tecnología 3D también ha supuesto beneficios en la práctica clínica, ya que el RP permite personalizar digitalmente estos elementos para cada paciente. *(Los resultados, en esta ocasión, se midieron en tasa de complicaciones y satisfacción del paciente con el resultado.)*

Principalmente, los implantes personalizados son empleados en cirugía craneofacial, oral y maxilofacial. Según se constata en el artículo publicado por Tack et al., el uso de este tipo de dispositivos reduce el tiempo de cirugía y/o tratamiento, además de mejorar los resultados médicos. Y, aunque en gran parte de los artículos se menciona un aumento en el coste del tratamiento, se han descrito también beneficios en coste-efectividad. (12).

Ya existe literatura sobre casos y procedimientos en los que se ha implementado esta aplicación de la impresión 3D.

En cirugía oral y maxilofacial, una de las especialidades donde más recorrido tienen las prótesis de impresión 3D, se han obtenido mayas de titanio para corregir defectos maxilares, barras arqueadas de aleación de metales para el tratamiento de fracturas mandibulares o maxilares, e impresión de espaciadores temporomandibulares impregnados de antibióticos para preparar la zona antes de la intervención quirúrgica.

En el campo de la cirugía craneofacial, ya se han probado implantes auriculares, entre otros, para la reconstrucción de defectos. Además, también se han impresos los modelos de la anatomía propia de estos pacientes para comprobar la adecuación de esos implantes.

En neurocirugía, es notable la impresión de cuerpos vertebrales de titanio para la reconstrucción de la columna vertebral en pacientes con neoplasias vertebrales. También se han creado implantes de polimetilmetacrilato (PMMA) para la reconstrucción de defectos craneales.

En esta misma línea, también existe la posibilidad de imprimir prótesis costales de titanio para la reconstrucción de la pared torácica tras resecciones pulmonares.

Por último, cabe destacar la existencia de líneas de investigación sobre la fabricación de bioandamios, en los que puedan desarrollarse tejidos vivos con la ayuda de factores de crecimiento, que se encuentran impregnados en el propio soporte.

o Fabricación de instrumentación y guías quirúrgicas

Además de fabricar material quirúrgico específico para cada paciente y abordaje quirúrgico, una de las grandes ventajas de la impresión 3D es poder acceder a todo tipo de instrumentación incluso en sitios en los que la distribución convencional de la misma es complicada.

Teniendo en cuenta el número de publicaciones que hacen referencia a esta aplicación, parece que la fabricación de guías quirúrgicas es el más extendido de la impresión 3D en medicina (12).

La mayoría de estos artículos se han desarrollado en el campo de la cirugía maxilofacial. El RP ha sido empleado para fabricar posicionadores y férulas, además de un número relativamente grande de obleas interoclusales para cirugías ortognáticas. También se han obtenido guías de corte y perforación.

De forma escueta, cabe destacar la fabricación de plantillas para cirugías pronto-orbitales complejas, empleadas en neurocirugía, donde se ha probado su precisión, facilidad de uso, eficiencia y reproducibilidad.

En general, según Tack et al., considerando todas las aplicaciones, la nueva tecnología 3D supuso una reducción en el tiempo de cirugía en el 46% de los estudios. En un 76% se mencionó que el objeto impreso tenía una buena exactitud, y en un 72% se mencionó un resultado médico mejorado (12).

i. TECNOLOGÍA 3D EN CIRUGÍA ORTOPÉDICA Y TRAUMATOLOGÍA

Como ya se ha mencionado, el uso de modelos anatómicos ofrece un gran potencial en el ámbito quirúrgico, siendo notoria su utilidad en COT. Aunque se trate de un sector joven en nuestro medio, el primer meta-análisis sobre los beneficios de su implementación en la planificación prequirúrgica demostró la existencia de diferencias significativas a su favor respecto a la planificación tradicional en términos de reducción del tiempo quirúrgico, pérdida de sangre intraoperatoria y uso de fluoroscopio (17).

El reemplazo de cadera, por ejemplo, ha sido una de las intervenciones que más se ha servido de la tecnología 3D: la literatura disponible coincide en reportar resultados médicos claramente mejores cuando se hace uso de esta herramienta.

También se han obtenido mejores resultados en casos de reparación de fracturas craneales, en las que se utilizaron modelos anatómicos a modo de guías previo a la cirugía para entender mejor su anatomía. En muchas ocasiones, estos modelos también sirvieron para fabricar implantes que se ajustan más adecuadamente a la anatomía del paciente, mejorando el resultado final, así como reduciendo el tiempo de cirugía (11).

Del mismo modo, el uso de modelos 3D impresos para la planificación de cirugías sobre variantes anatómicas raras también ha sido probado. De hecho, la utilización de modelos anatómicos específicos del paciente es particularmente valioso en estos casos, en los que hay variantes anatómicas y graves deformidades (17).

En revisiones de discectomías lumbares, los estudios demostraron una disminución del tiempo y pérdida sanguínea durante la intervención.

Otras aplicaciones en ortopedia publicadas incluyen la planificación de la corrección de ostecondromas, cirugía pélvica, y la corrección de la inestabilidad de hombro.

En fracturas complejas de la meseta tibial (Schatzker V y VI), el uso de modelos impresos 3D elimina eficazmente las limitaciones de la visualización 2D de la articulación en el tratamiento con fijación externa y mejora la calidad de la reducción, reduciendo el sangrado intraoperatorio, el tiempo de cirugía y duración de la estancia hospitalaria, asegurando una buena función postoperatoria (13).

Se han probado los beneficios de estudiar casos de enclavamiento intramedular en fémures severamente arqueados y fracturas atípicas, sobre los modelos específicos del paciente y los ejemplos publicados sobre la fabricación de placas de titanio preformadas a partir de estos modelos incluyen reducciones de fracturas de calcaneo y claviculares.

Más allá de simplemente utilizar el modelo anatómico para dar forma física al implante, estos modelos también se han utilizado para diseñar la estructura del implante y analizar la distribución de la tensión transferida al mismo.

La impresión 3D también se ha utilizado para fabricar hardware de fijación externa personalizado. Ya se ha utilizado la tecnología de reducción asistida por computadora para diseñar este material, no sólo adaptándolo al paciente sino haciendo su montaje más sencillo, mediante la creación de orificios para atornillar la fijación de una forma más eficaz. Una de las indicaciones más estudiada ha sido las fracturas tibiales. Los autores llamaron a este dispositivo el "Q Fixator" y constataron que se manipulaba fácilmente y que permitía una reducción y fijación exitosa independientemente de la experiencia del cirujano.

Siendo la fabricación de guías quirúrgicas e instrumentación la aplicación más estudiada de la fabricación 3D (11), podemos encontrar muchas referencias en este sentido en COT.

Existen estudios donde se analiza la precisión en la resección de un osteosarcoma con la ayuda de guías quirúrgicas específicas, en la osteotomía correctiva en deformidades en

pronación, artroplastias unicompartmentales de rodilla y para guiar la inserción de tornillos en fracturas complicadas de la meseta tibial.

El uso de guías quirúrgicas impresas en 3D en aplicaciones ortopédicas ha resultado en un tiempo operatorio más corto y una menor pérdida de sangre intraoperatoria.

ii. IMPRESIÓN 3D EN CIRUGÍA DE CADERA

La cirugía de pelvis y cadera excluye de por sí técnicas de reconstrucción sencillas, dada su compleja anatomía. Es en este tipo de intervenciones donde más respaldada se ha visto la aplicación de tecnología 3D, que se ha empleado para cubrir esta necesidad de preparación previa a una cirugía complicada, que resulta exigente incluso para el cirujano experimentado (18) y para cuya resolución es fundamental el conocimiento de la anatomía esquelética y de las fracturas óseas. Su compleja anatomía, en relación con la de las extremidades, dificulta su comprensión con imágenes clásicas; la radiografía simple ofrece una información muy limitada de la fractura acetabular y su impresión 3D puede jugar un papel importante en este sentido (la fractura acetabular es difícil de clasificar no sólo por la anatomía sino también por las estructuras neurovasculares y viscerales que la rodea). Por otra parte, dadas las variaciones morfológicas entre los individuos y los variados patrones de fractura, es difícil crear una osteosíntesis universal adecuada para cada paciente. De este modo, la impresión 3D ayuda a comprender y clasificar con confiable seguridad los tipos de fractura acetabular (19) y a personalizar el tipo de osteosíntesis según el paciente.

El uso de un sistema de planificación virtual computarizado en la cirugía de fractura acetabular es una herramienta valiosa para que el cirujano comprenda mejor el patrón de fractura (20). Los modelos impresos en 3D se han utilizado para la planificación preoperatoria y la fabricación de guías quirúrgicas e implantes articulares. Upex y col. informaron de una técnica quirúrgica para tratar fracturas de ambas columnas del acetábulo con placas preconformadas en modelos de impresión 3D, que puede reducir los tiempos de operación e instrumentación durante la cirugía (20). Otros autores también han utilizaron modelos impresos en 3D de fracturas acetabulares complicadas para lograr una comprensión de los patrones de fractura, aclarar el sistema de clasificación reduciendo significativamente el grado de variabilidad interobservador (22), complementar la docencia y producir osteosíntesis y plantillas quirúrgicas personalizadas (23), (24), (25). Las placas de osteosíntesis se pueden conformar al modelo impreso y se puede estimar la longitud de los tornillos antes de la cirugía. También la fabricación de instrumentación específica para el paciente ha demostrado beneficios a la hora de resecciones tumores, en las que se optimiza el margen tumoral a resear y la elección del tamaño del injerto (26).

Siguiendo la línea de estudios anteriormente mencionados, Huang et al. y otros grupos concluyen en sus trabajos que el uso de la simulación e I3D en el preparatorio era un método efectivo para el tratamiento de fracturas acetabulares, que podía reducir el tiempo de operación, instrumentación y fluoroscopia, la pérdida sanguínea y necesidad de

transfusión, y mejorar la calidad de la reducción quirúrgica (22), (27), (28). Estos mismos resultados han sido descritos para otro tipo de fracturas (intertrocantéreas) e intervenciones como la colocación de prótesis totales de cadera (29) y la corrección de displasias de cadera congénitas (30).

VI. CASO CLÍNICO: DISPLASIA DE CADERA DE AÑOS DE EVOLUCIÓN

Paciente varón de 16 años que acude a consulta de COT en 2016 para valoración de una luxación de cadera derecha congénita, ya conocida pero no tratada. Presenta diversas patologías, que carecen de interés para este caso.

Actualmente puede caminar, aunque los desplazamientos largos los realiza con silla de ruedas. También juega a baloncesto con la silla, pero hace boxeo en bipedestación. Presenta una deambulación con trendelemburg.

A la exploración física, se aprecia un acortamiento de MID de más de 3 cm con respecto a MII.

Se solicita una primera Rx de pelvis y cadera, donde se observa una displasia de cadera tipo II según las clasificación de Hartofilakidis (luxación baja con falso acetábulo en contacto con el verdadero), y una disimetría de 4,26 cm.

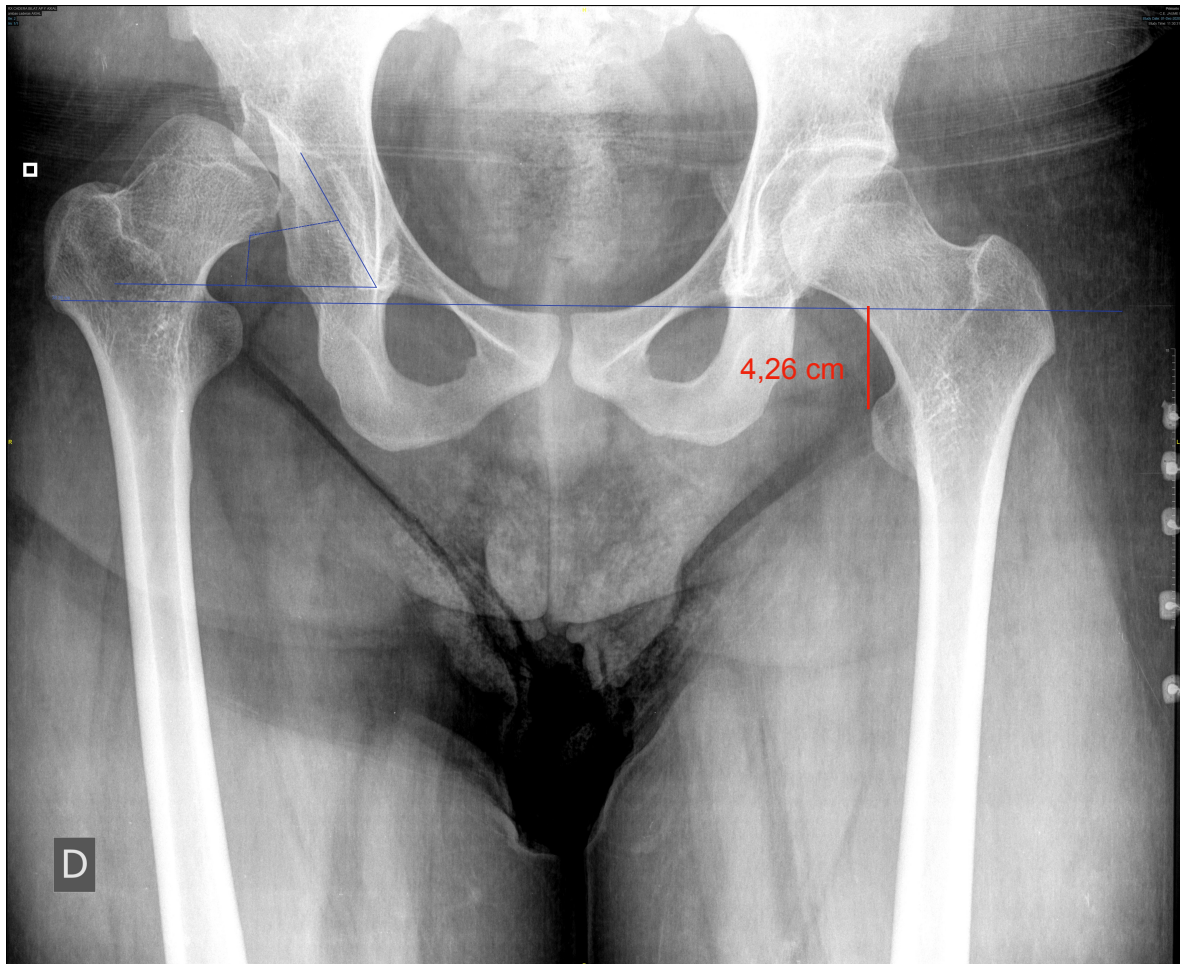


Fig. 5. Rx de pelvis del paciente.

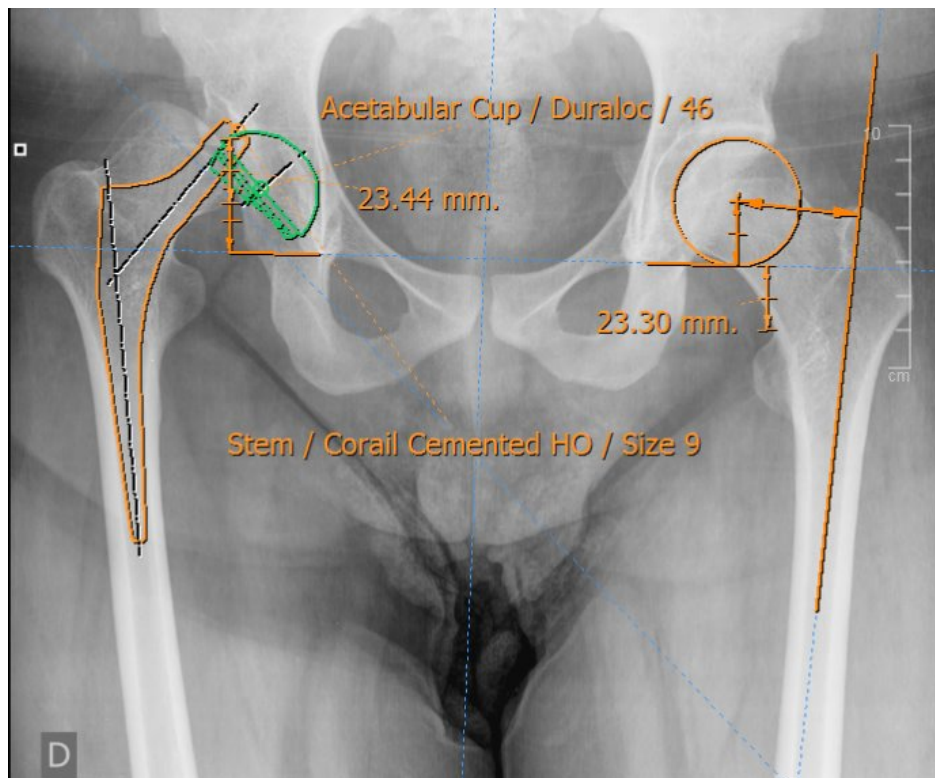


Fig. 6. Rx de pelvis del paciente sobre la que se ha calculado la disimetría y dibujado la orientación protésica inicial.

Se le informa de las posibilidades terapéuticas, basadas en la intervención quirúrgica con colocación de PTC. En 2016, el paciente no tiene claro querer someterse al procedimiento y, además, debe perder peso para poder ser candidato a cirugía.

Se solicita TAC para completar estudio, que se informa como:

Cadera derecha (displásica):

- Acetábulo displásico
- Fémur derecho con cuello ensanchado, cabeza aplanada y escasamente desarrollada, luxada en sentido superolateral, articulando en un neocotilo localizado justo por encima del verdadero acetábulo.
- El ángulo de Wiberg se encuentra disminuido, aunque es de difícil medición por la falta de superposición de estructuras.
- Ángulo de inclinación acetabular (59.9°).

Cadera izquierda

- Cabeza femoral normoposicionada, con indentación adyacente a la fosita del ligamento redondo.
- Ángulo de Wiberg dentro de la normalidad (aproximadamente 30°).
- Cambios degenerativos artrósicos incipientes con disminución del espacio articular coxofemoral superior.

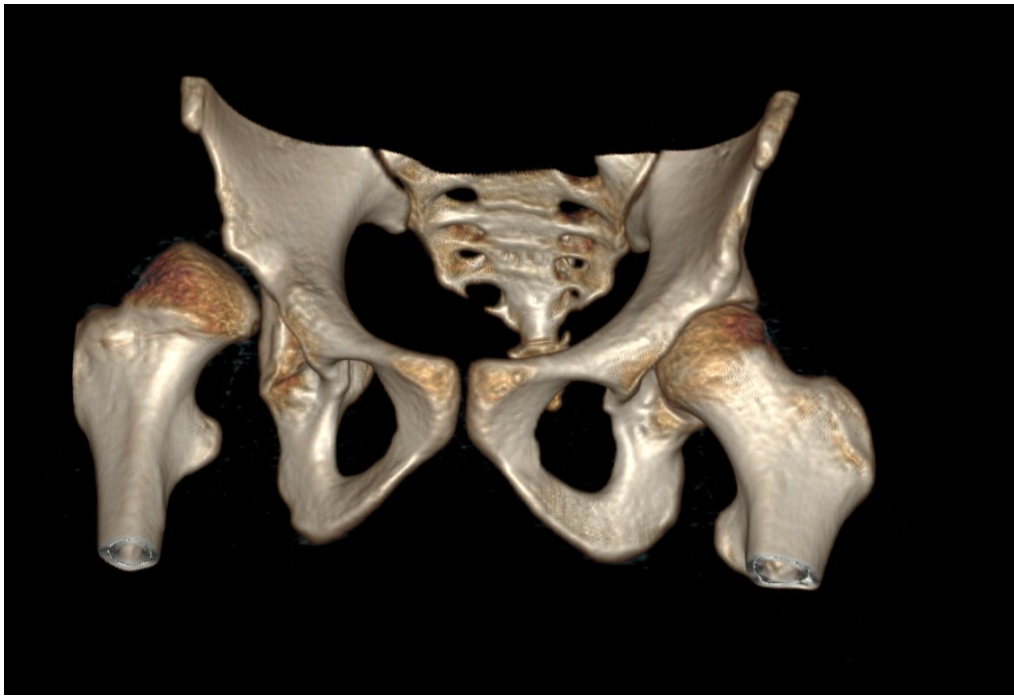


Fig. 7 y. 8. Reconstrucción 3D ofrecida por el propio PACS a partir del estudio TAC

Se dan instrucciones para la pérdida de peso previo a la cirugía.

Tras adelgazar 18 kg acude nuevamente a consulta, momento en el que se le incluye en la lista de espera quirúrgica y se programa la intervención. En ese momento:

- Peso: 103 kg (140 kg hace un año)
- Rx: ya valoradas.

Se explica que tras la intervención, notará la pierna derecha más larga, aunque en realidad serán de una medida más parecida (se informa al paciente de que esta diferencia no podrá ser corregida por completo; el paciente lo entiende y consiente el procedimiento).

Se programa un nuevo control en enero para reevaluar peso (la cirugía se programará cuando el peso sea menor de 100 kg).

En febrero de 2021 el peso ha descendido a 99.8 kg, por lo que se programa la intervención para el 28 de abril de 2021.

Dada la complejidad del caso, y la importancia de conseguir un resultado óptimo, este paciente es un candidato ideal subsidiario a la planificación prequirúrgica con un modelo anatómico impreso con tecnología 3D. Su caso ha sido empleado para mostrar el protocolo a seguir a la hora de diseñar e imprimir objetos 3D en el ámbito hospitalario.

Una vez impresa la cadera del paciente, sobre ella se han estudiado las vías de abordaje más adecuadas y la secuencia de procedimientos que se seguirá el día de la cirugía programada.

A continuación, se muestran unas imágenes de esta parte del proceso.



Fig. 7. Fresado acetabular sobre el modelo anatómico del paciente para comprobar el tamaño y la orientación más adecuada del implante acetabular con el fin de corregir la deformidad displásica y obtener una biomecánica más fisiológica

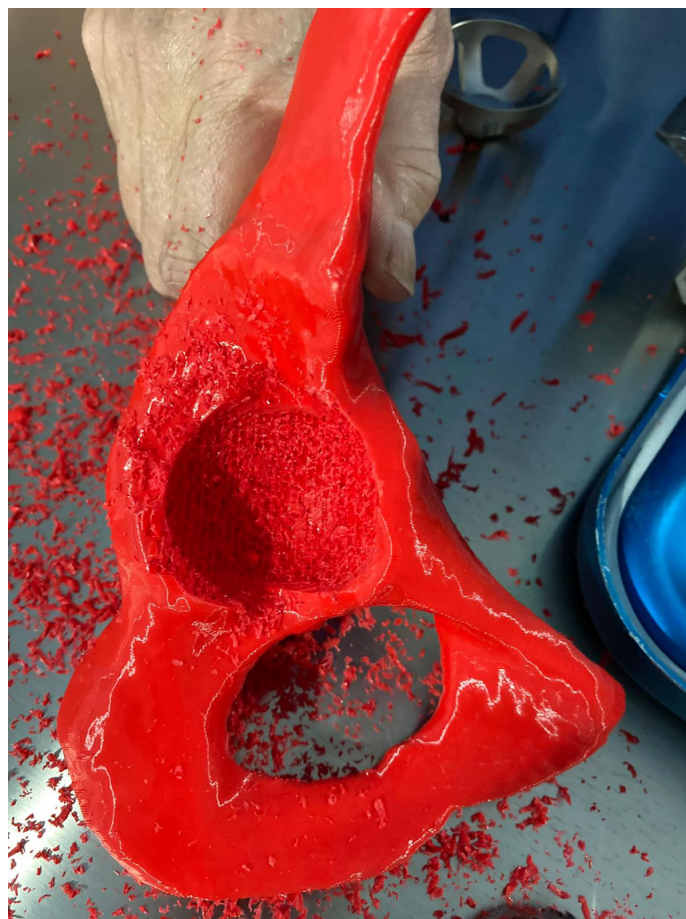


Fig. 8. Resultado del lecho óseo trabajado para alojar el nuevo acetábulo protésico



Fig. 10. Colocación del implante acetabular de prueba con máxima cobertura ósea pero con una orientación subóptima



Fig. 9. Colocación del implante acetabular de prueba con una orientación óptima para obtener una cadera protésica estable pero con una pobre cobertura ósea en la zona postero-superior manifestando que, probablemente precisará un aumento de la cobertura acetabular mediante autoinjerto óseo (cabeza femoral propia) o bien un implante atornillado.

El resultado tras la colocación de la prótesis total de cadera se muestra en la Fig.10. Se aprecia una reducción de la disimetría que, no llegando a ser completa, resulta satisfactoria para el paciente dada la magnitud de la misma en los estudios preoperatorios.

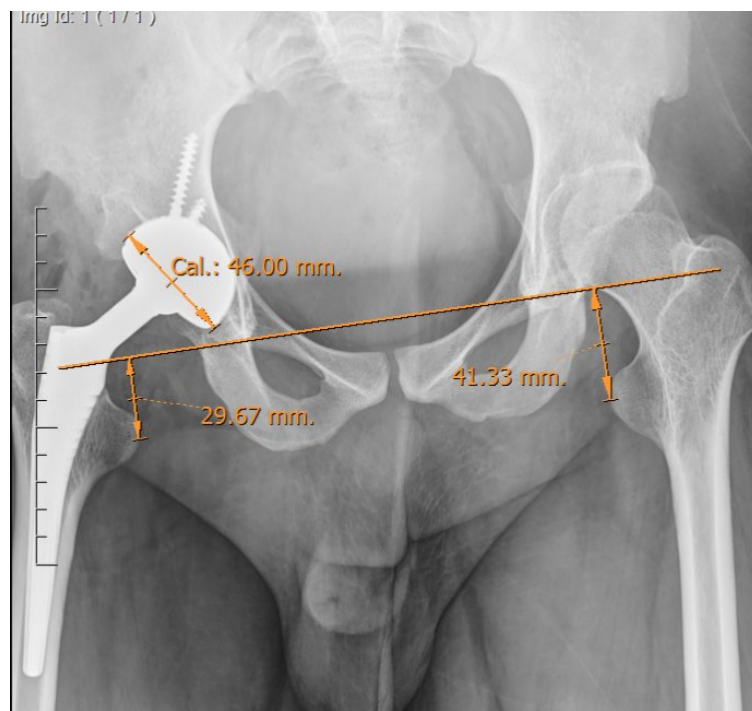
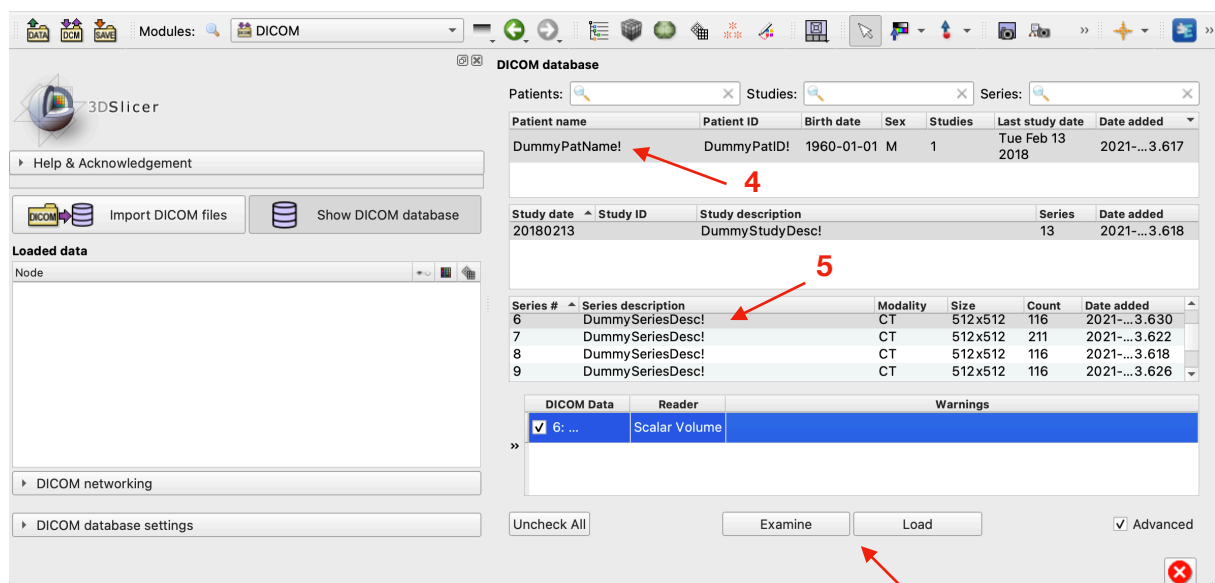
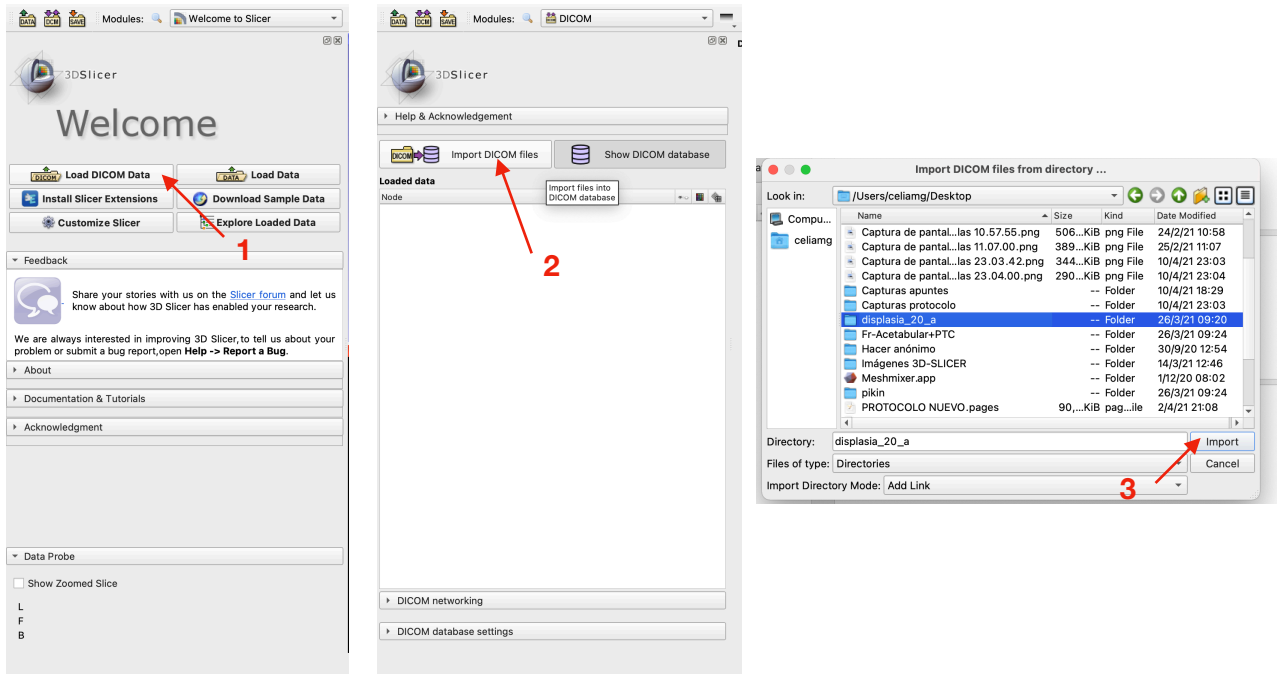


Fig. 10. Posición protésica tras intervención quirúrgica.

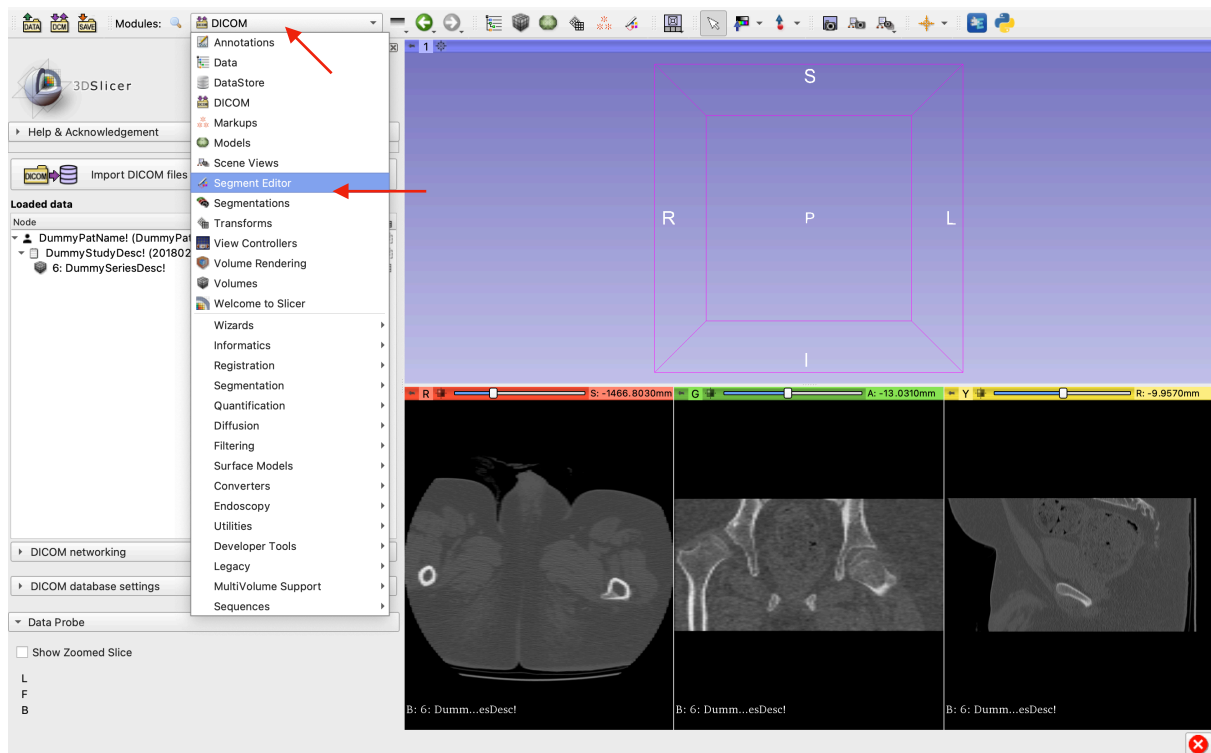
VII. GUÍA PRÁCTICA PARA EL DISEÑO DE MODELOS ANATÓMICOS 3D (32)

1. Se abre el programa 3D Slicer y se importa la secuencia DICOM.

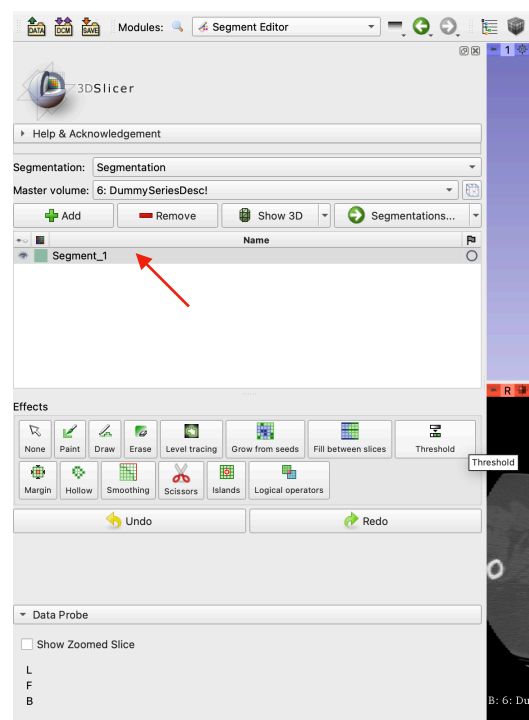
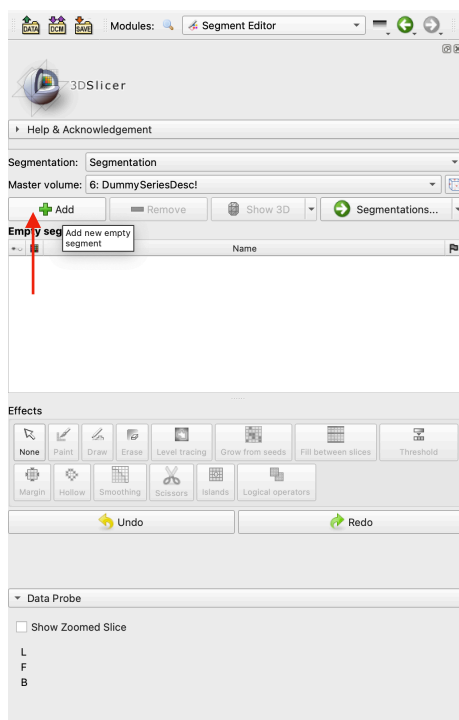


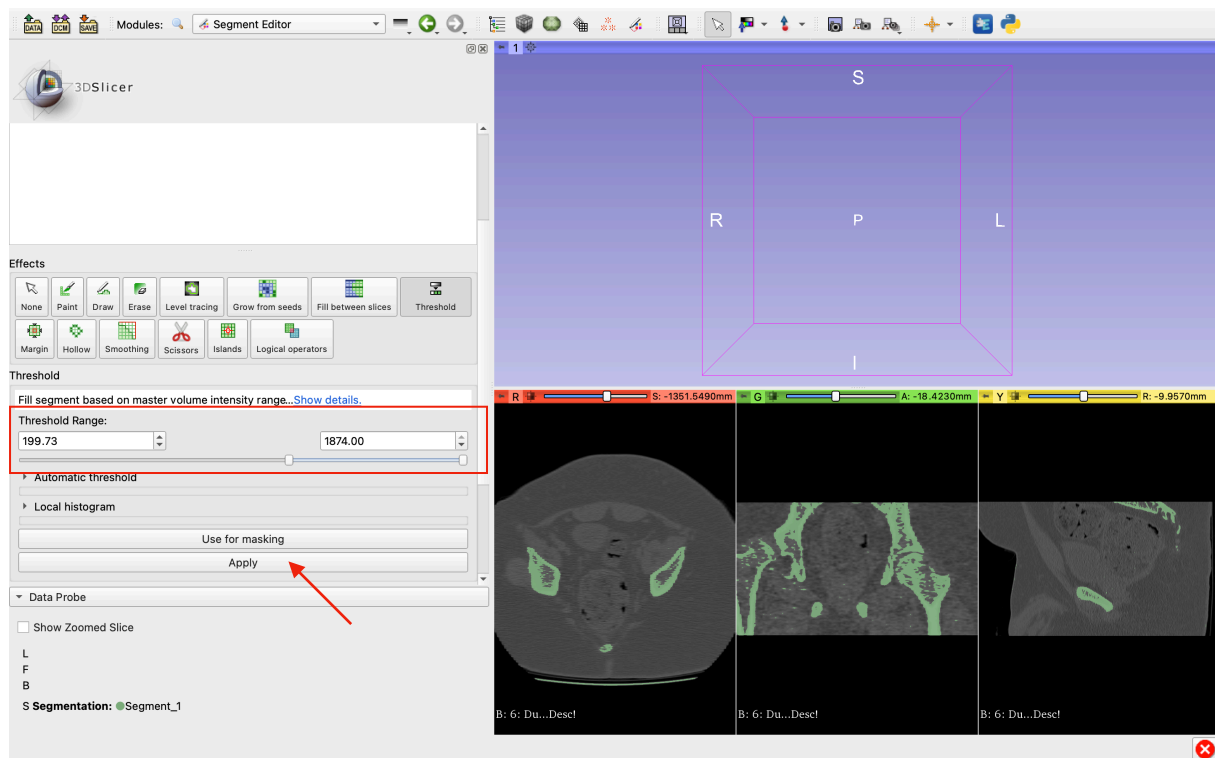
6: se presiona sobre "examine", tras lo cual aparecerá el tipo de estudio seleccionado. Se selecciona y se clicla sobre "load".

2. Seguidamente, aparecerá el estudio escogido en las ventanas correspondientes a las vistas transversal, frontal y sagital del mismo. Se debe seleccionar el módulo “**Segment editor**”, que permitirá transformar la imagen TAC en el modelo 3D gracias a diferentes herramientas que se indican a continuación.

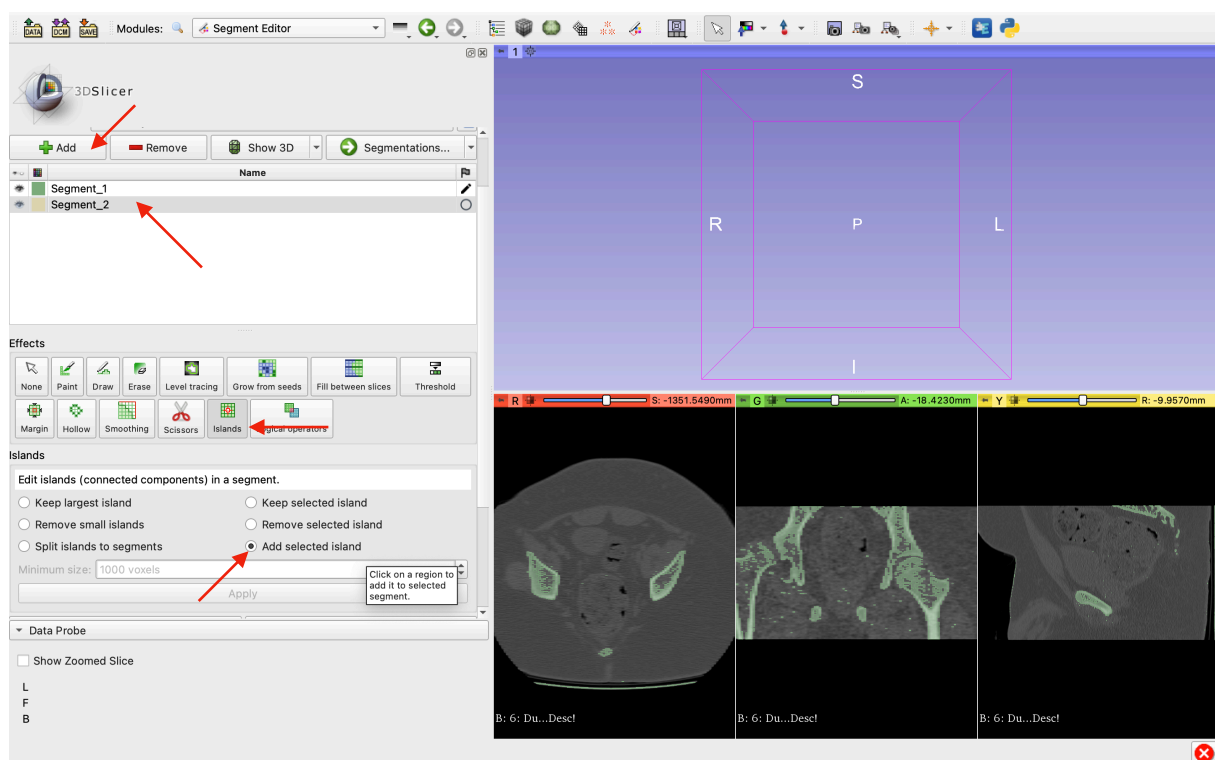


3. Se añade un nuevo segmento con el botón “Add”, y con la herramienta “**Threshold**”, se ajustan las unidades Hounsfield que queremos seleccionar. En este caso, interesa diferenciar el tejido óseo del resto, por lo que acotaremos el rango entre 200 y 1874.00 unidades Hounsfield aproximadamente.

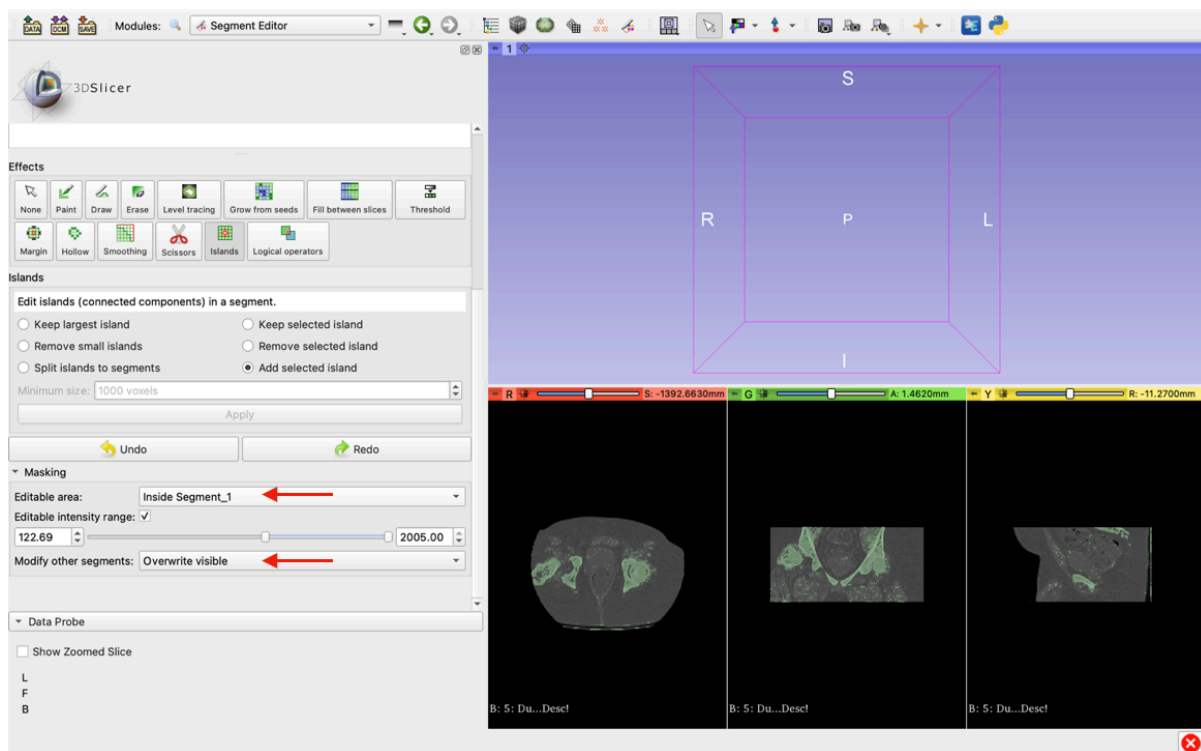




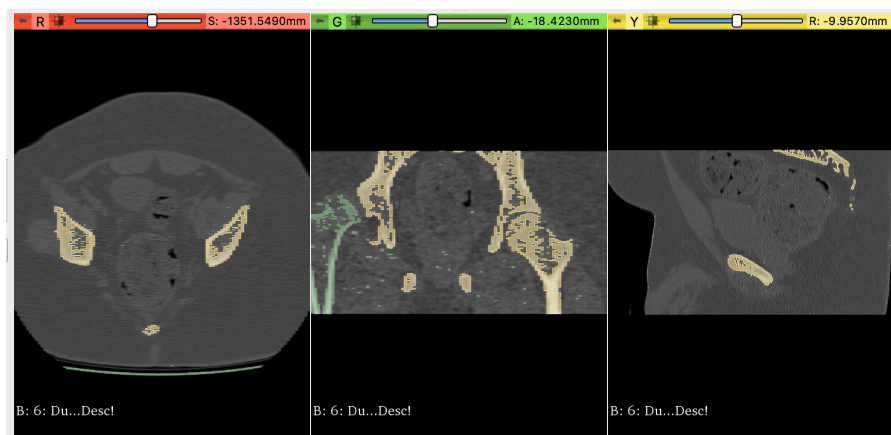
4. Se vuelve a añadir un nuevo segmento con el botón “Add”, que se denominará Segment_2 por defecto. Seguidamente, manteniendo seleccionado este segundo segmento, se elige la herramienta “Islands” con la opción de “Add selected island”.



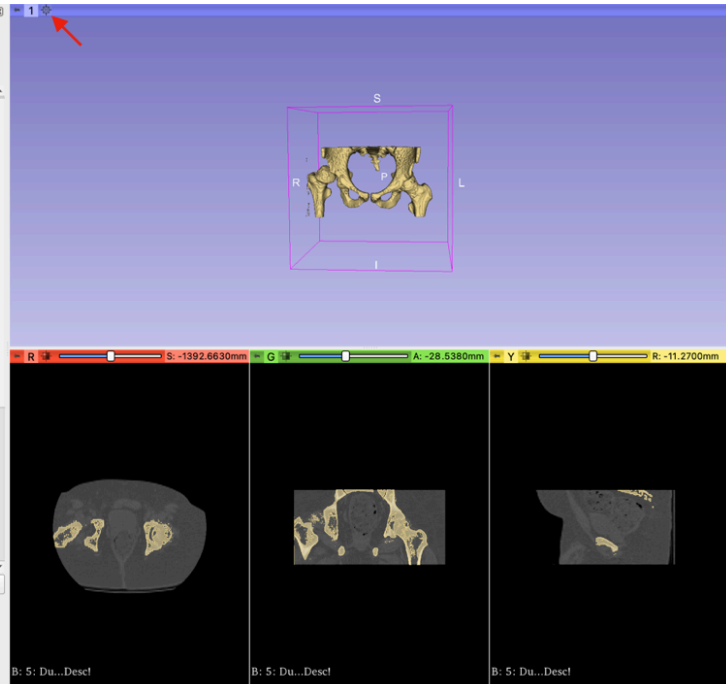
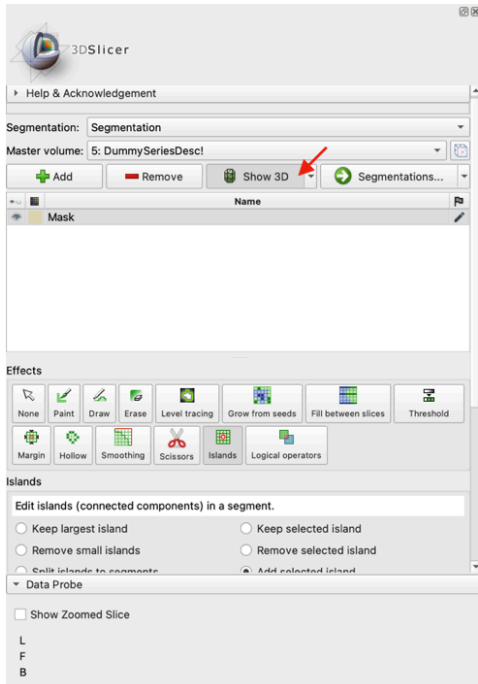
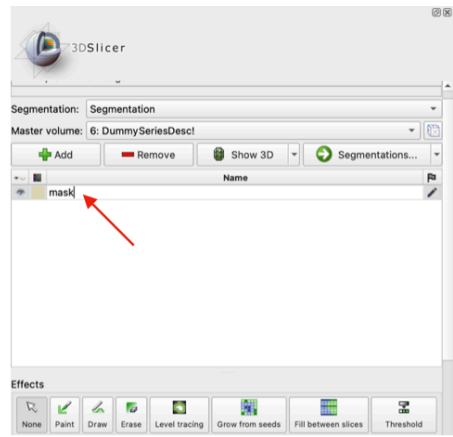
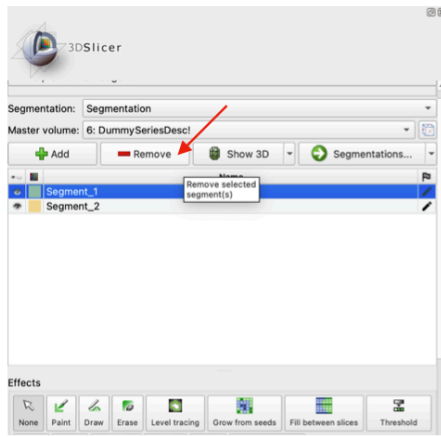
Se trabaja con el área editable dentro de Segmento_1, sobreponiendo las nuevas capas encima de las que se encuentran visibles (señalizadas con un ojo abierto a la izquierda del nombre de la capa o segmento).



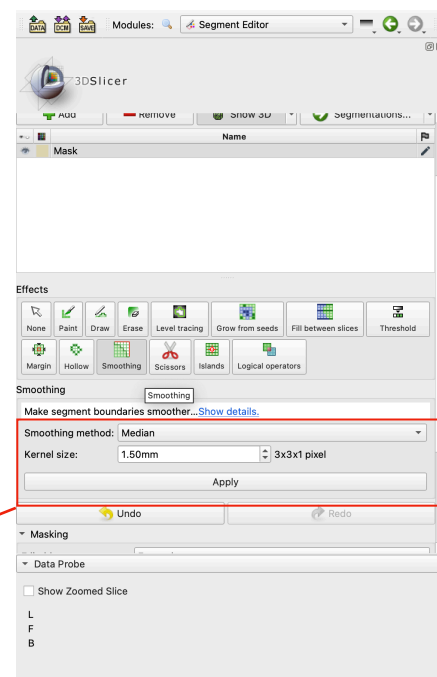
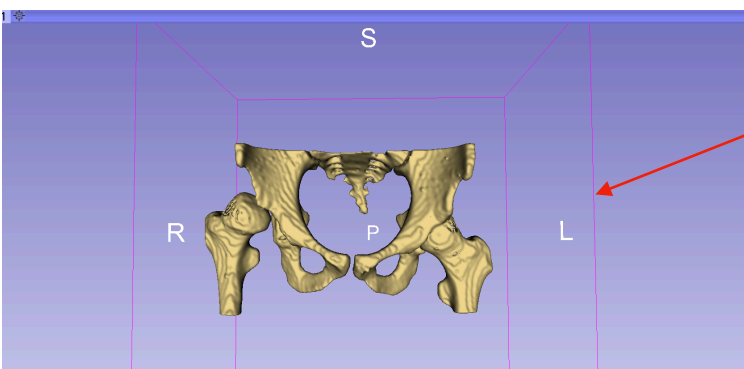
5. Si no cambian de color automáticamente todas las partes que se quieren incluir en el nuevo segmento, se debe ir marcando manualmente sobre las ventanas en las que se muestra el estudio TAC el tejido coloreado con el Threshold del Segment_1.



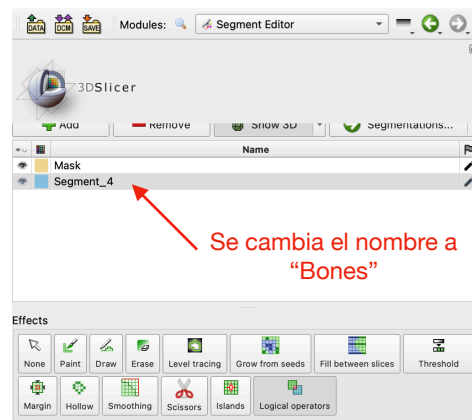
6. Una vez creado el Segment_2 sobre el Segment_1, se elimina Segment_1: se selecciona y marcamos la opción "Remove". A continuación, se cambia el nombre del Segment_2 a "Mask", reescribiendo por encima del mismo. Esta capa será la subyacente a las posteriores, que se crearán para separar los diferentes componentes del modelo. Acto seguido, manteniendo marcado "Mask", se pincha sobre Show 3D y después sobre la brújula de la esquina superior izquierda de la ventana 3D.



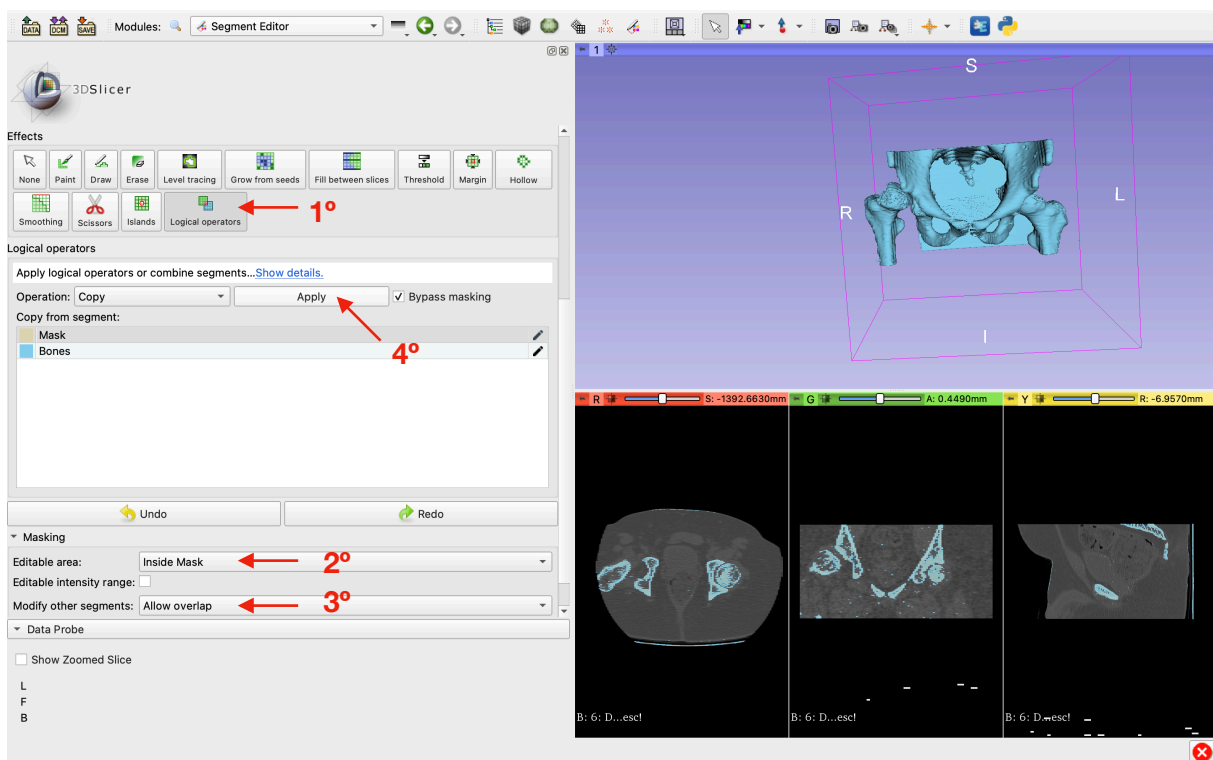
Según se haya elegido un threshold más amplio o más estrecho, el modelo 3D que se obtiene puede contener algunos defectos. Para suavizar la superficie del objeto, existe la herramienta **“Smoothing”**, que permite alisar el modelo hasta los milímetros con los que se ha hecho el corte TAC. Habitualmente este valor oscila entre los 1,5 y 2 mm, si se quiere obtener un modelo lo más preciso posible.



7. A partir de aquí, se trabaja sobre la capa “Mask”. En primer lugar, se ha de añadir una nueva capa. Por defecto, esta recibirá un nombre estándar que, para facilitar la comprensión del modelo, se podrá cambiar a “Bones”, o a cualquier nombre a la elección del usuario.

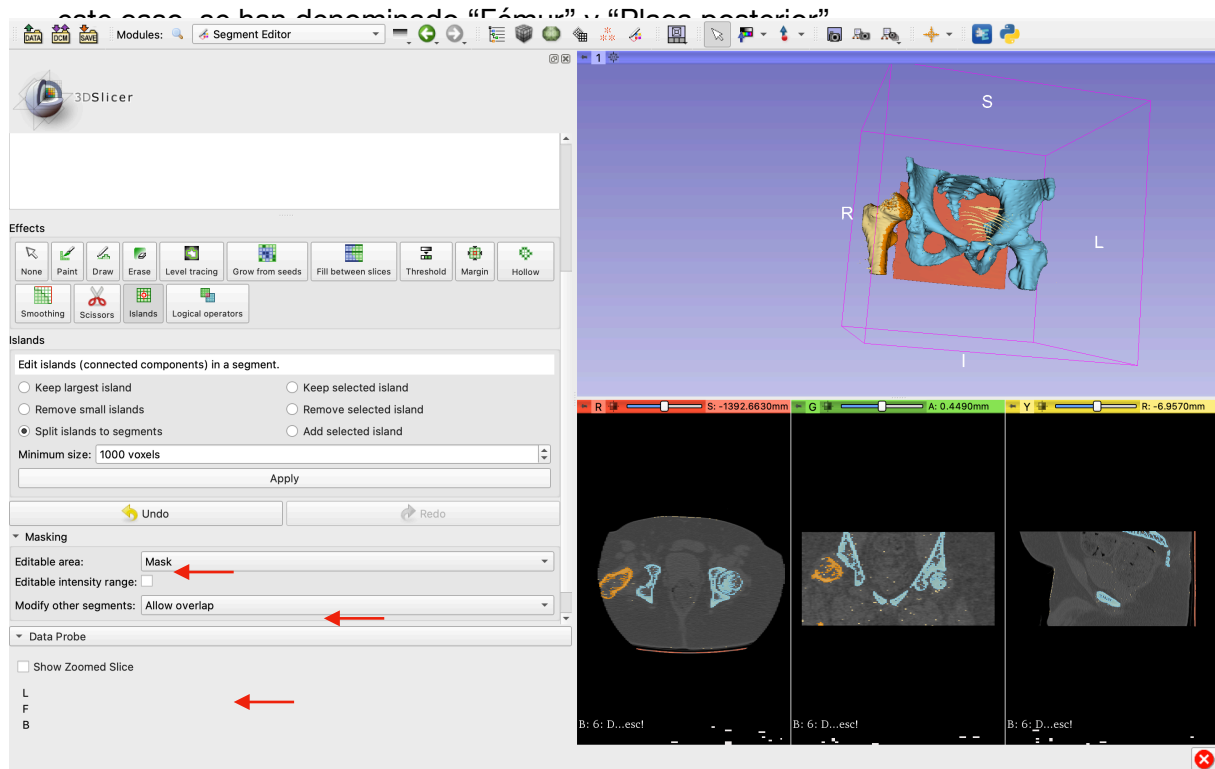


Se procede de igual forma que antes: con **“Logical operators”**, seleccionado sobre el segmento Bones, aplicamos la copia a “mask”. Se debe indicar que el área editable está dentro del segmento Mask y que queremos solapar ambos segmentos.

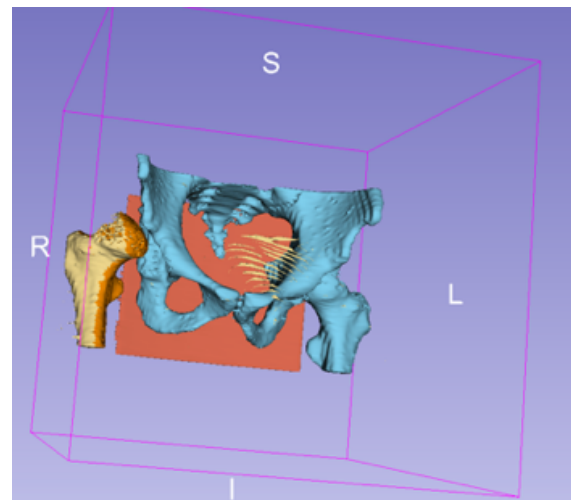


8. A continuación, se procede a crear los segmentos, que nos diferenciarán las diferentes partes del modelo. Se trabaja sobre la capa “Bones”. Con la herramienta “Islands” y la opción “Split Islands to segments”, automáticamente, el programa añadirá capas de diversos colores según identifique estructuras independientes. Como ha sucedido con

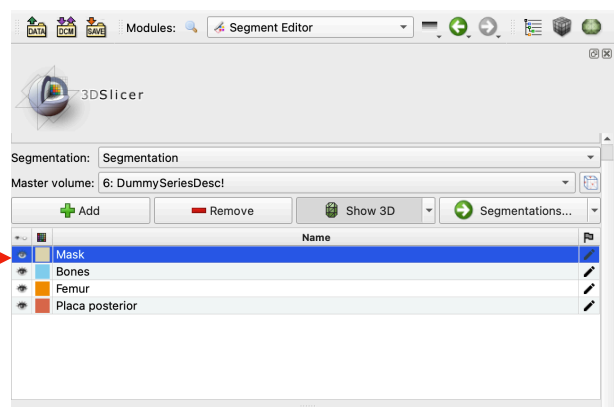
los anteriores, los nombres de estos nuevos segmentos pueden ser modificados (en



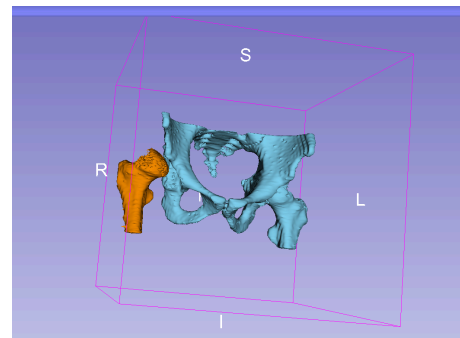
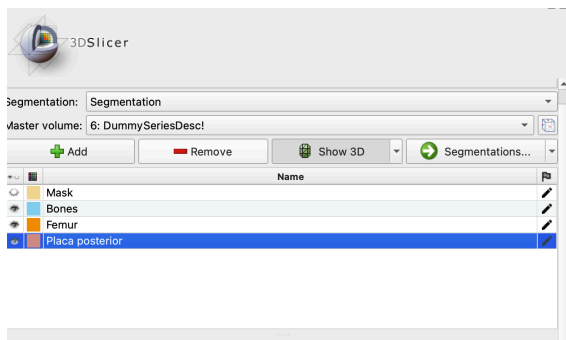
Como se muestra en la imagen de la derecha, se ha coloreado la placa posterior correspondiente a la mesa del escáner y algunas zonas calcificadas anteriores. También se observa cómo, al trabajar con la opción de "Overlap", la capa Mask aparece entremezclada con el resto. Esto no supone un problema, porque podemos ocultar este segmento y eliminar el correspondiente a la lámina posterior.



Con el ojo ubicado a la izquierda del color del segmento, se puede ocultar o hacer visible la capa correspondiente



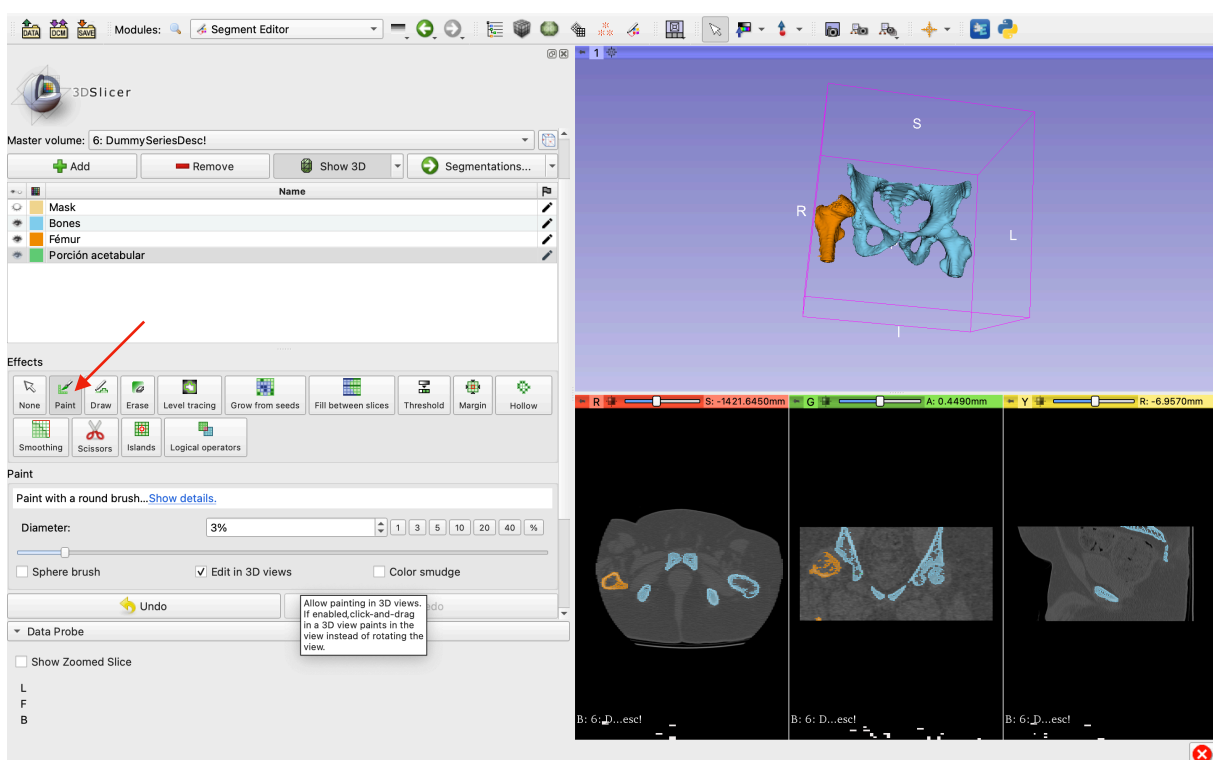
Para eliminar la capa correspondiente a la placa posterior, tan solo se debe seleccionar y clicar sobre “Remove”. El resultado será un modelo 3D donde solo se visualizan las dos capas seleccionadas.



- El siguiente paso, es colorear manualmente el acetábulo displásico, que no ha sido destacado automáticamente, posiblemente por no haber seleccionado un threshold lo suficientemente discriminativo. El threshold es lo que más condiciona el trabajo posterior; como se mostrará más adelante, parte del hueso no se incluye en el modelo por corresponder a hueso esponjoso o hueso con menos mineralización, a la par que la unión de la pelvis con el coxis no se diferencia del todo por estar en muy estrecho contacto en ciertos puntos.

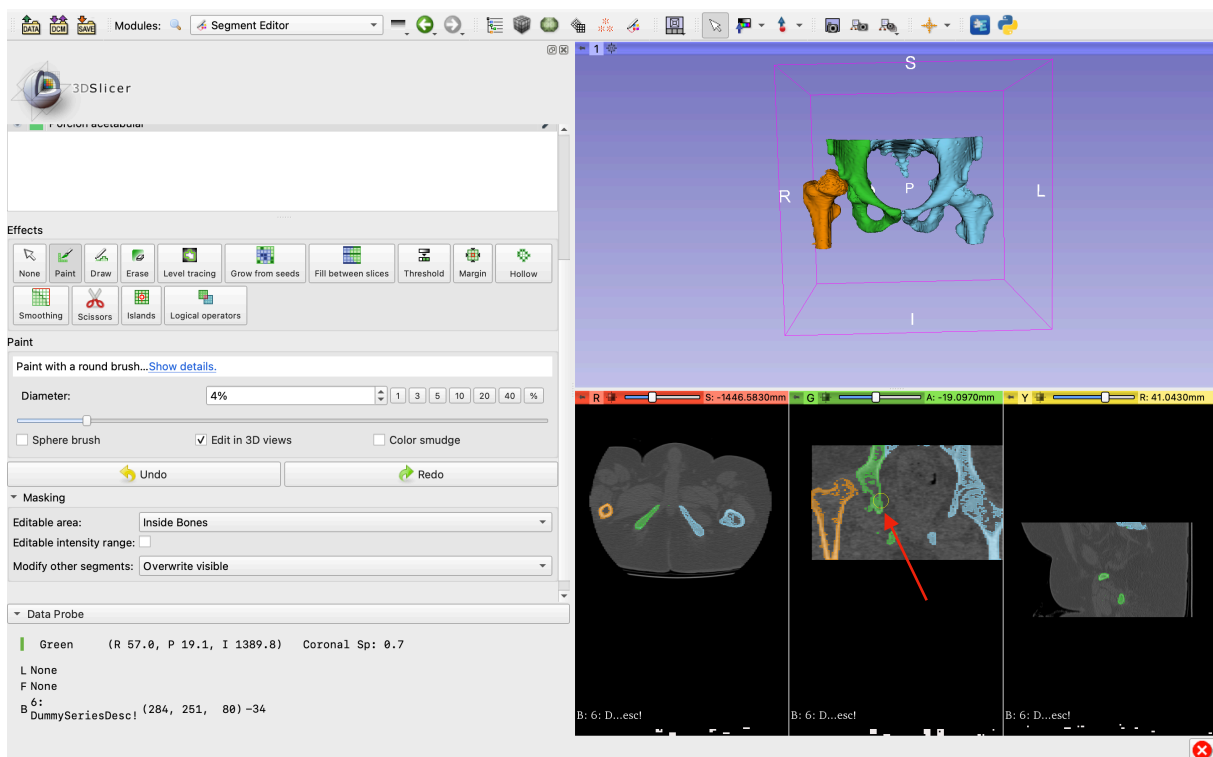
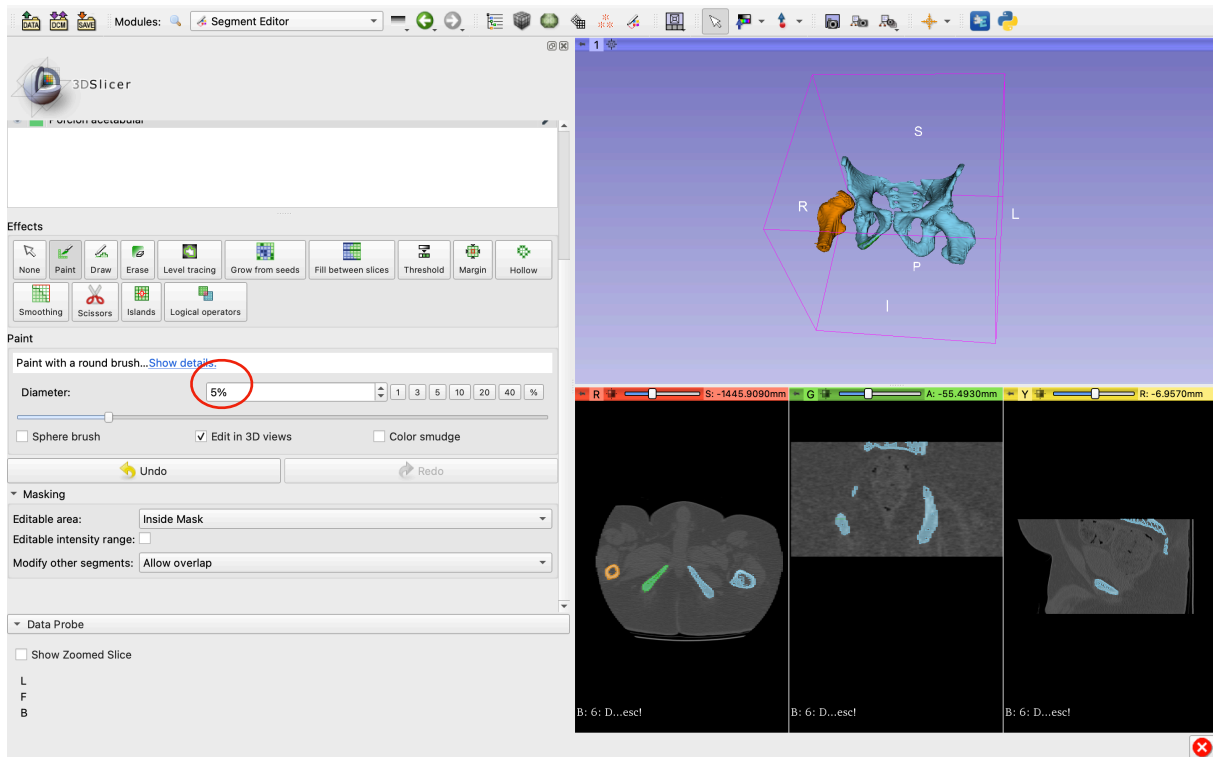
Esta tarea de colorear requiere un poco de tiempo, pero el resultado es óptimo, tanto como la segmentación automática.

Para ello creamos un segmento nuevo (“Add”), al cual se le puede denominar “Porción acetabular”. Se le asigna un color a elección del usuario y se selecciona la herramienta “Paint”.

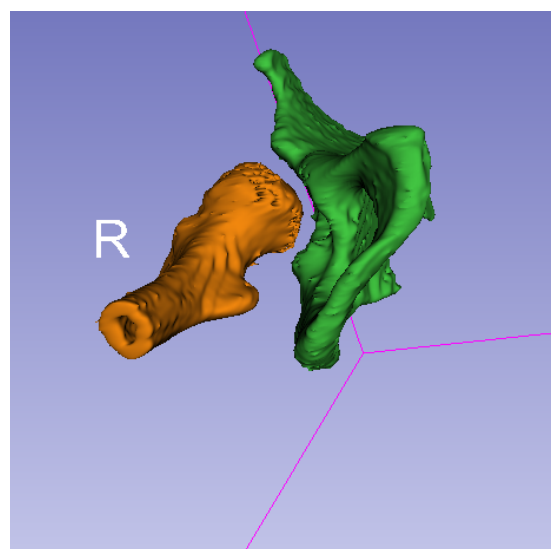
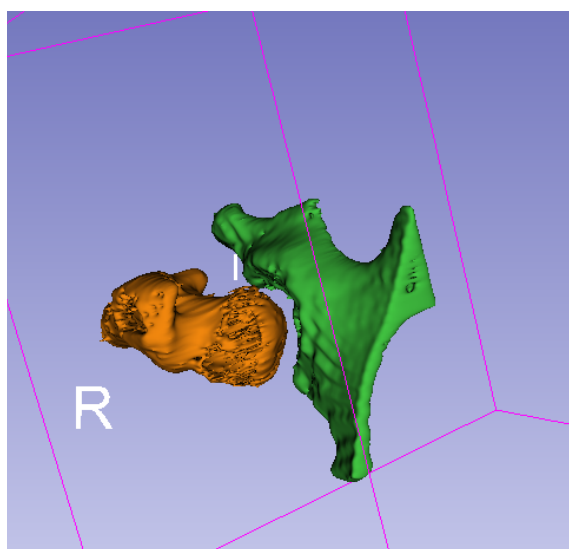
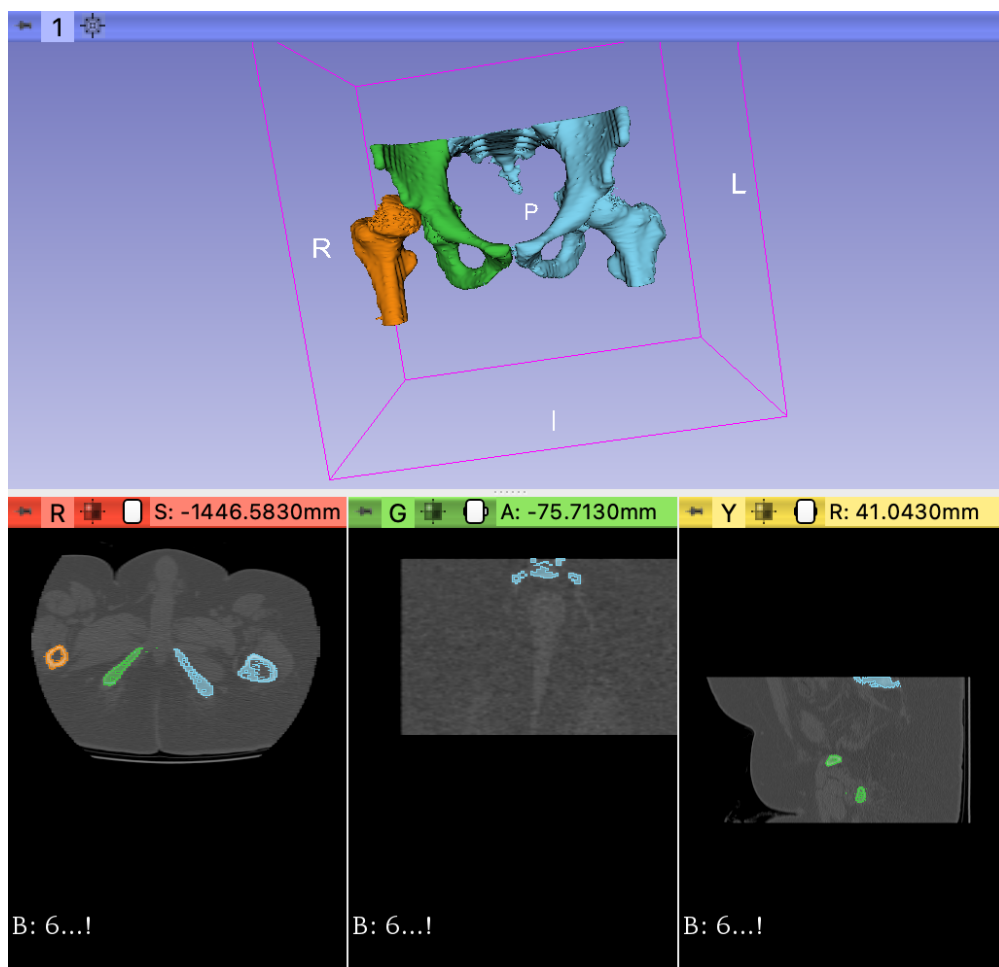


Podemos ajustar el tamaño del pincel acorde a la cantidad y complejidad de los detalles que incluya el modelo. Debemos recordar que se está trabajado dentro de la máscara Bones.

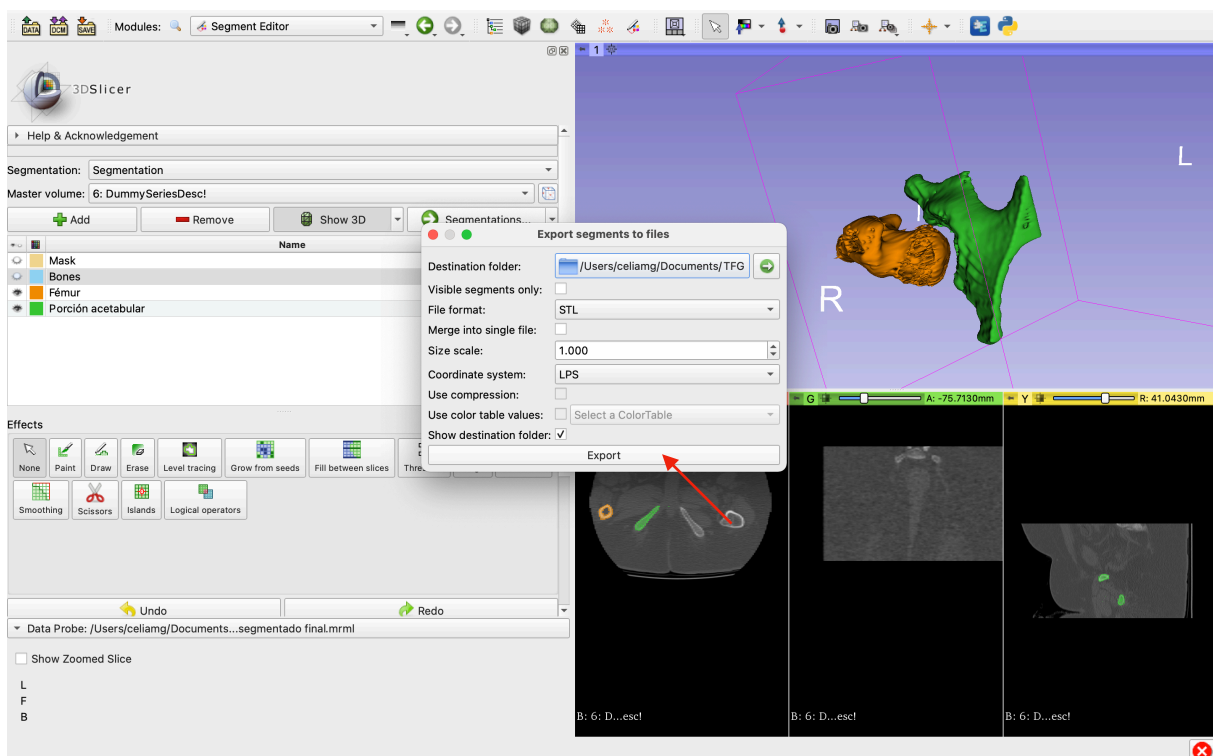
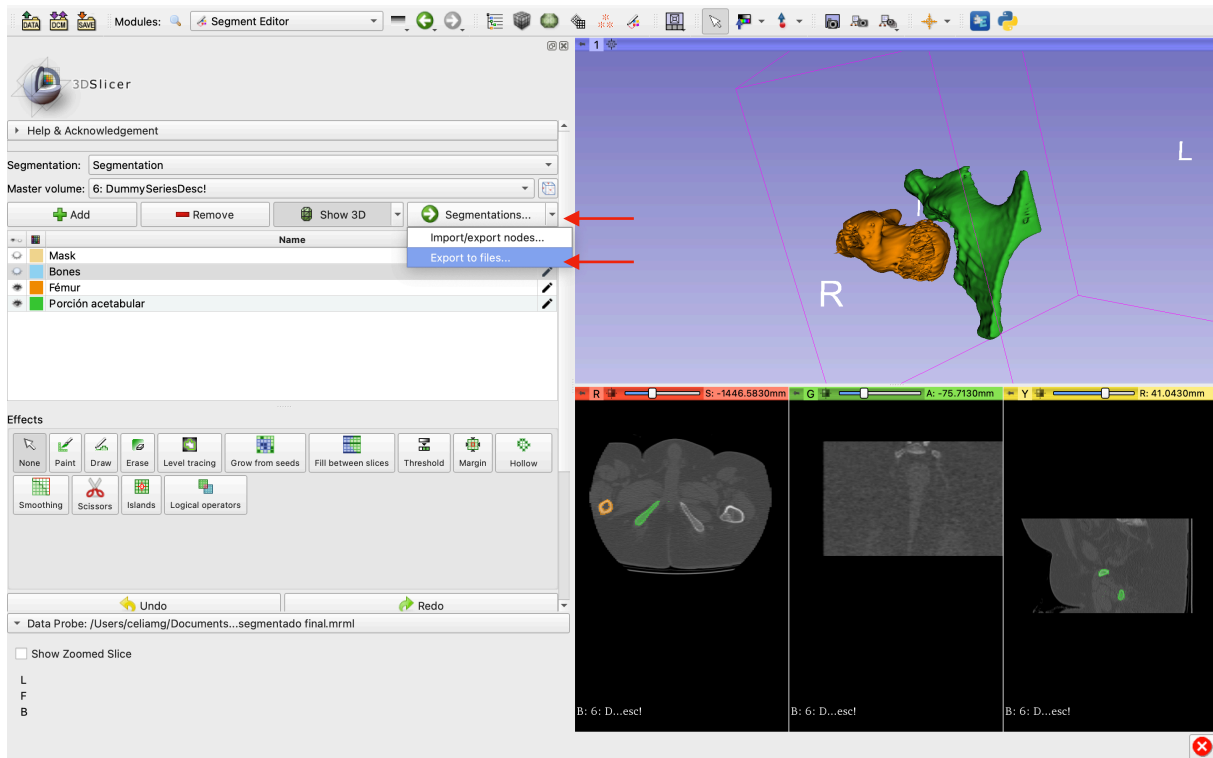
Como recomendación, para agilizar este proceso, lo ideal es elegir la vista donde se visualice la porción a colorear de manera más compacta, y trabajar solo sobre esa vista, para que no quede ningún fragmento óseo sin incluir en el nuevo segmento, ya sea visible o quede incluido en el interior del hueso.



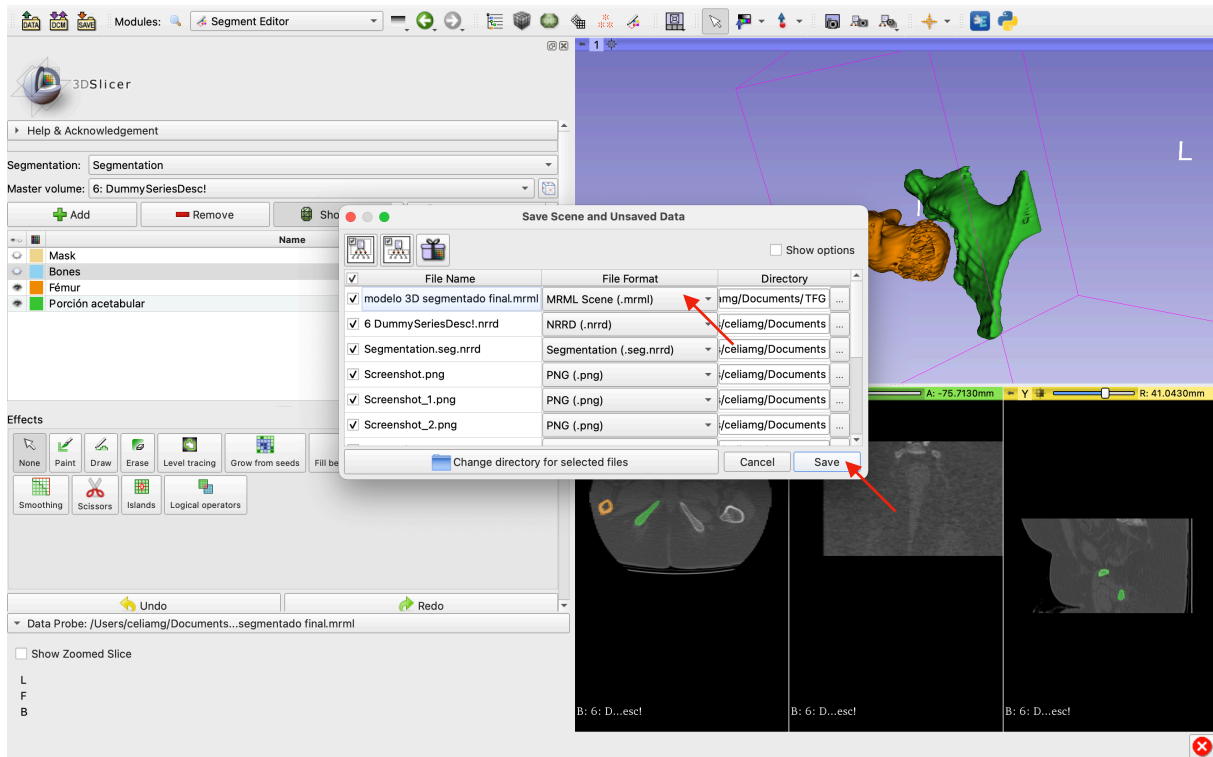
10. Una vez hayamos creado tantas capas como partes del modelo queramos diferenciar, el archivo está listo para guardar.



El formato mencionado en el apartado 1.4. y que es reconocido por la mayoría de las impresoras 3D disponibles en el mercado es el formato STL. Cada uno de los segmentos se guardará por separado, de modo que fémur y pelvis se imprimirán como dos elementos independientes. Este último paso es sencillo, tan solo hay que exportar el archivo al formato deseado.



También existe la posibilidad de guardar todo el modelo en su conjunto, en formato MRML.



Con esto, hemos finalizado el proceso y habremos guardado nuestro modelo 3D digitalizado, en un formato legible por las impresoras 3D.

VIII.CONCLUSIÓN

La estructura de este trabajo final de grado difiere en cierto modo del protocolo tradicional, en cuanto a que las recomendaciones no se han basado en la unificación de la evidencia publicada sobre estos programas. Esto se debe a que el programa informático es estático; cada herramienta disponible en él tiene un objetivo concreto, y dentro de un mismo software, no hay varias alternativas a comparar para completar la misma acción. Para ello, se debería realizar una comparativa entre distintos software.

No obstante, uno de los objetivos de este protocolo era demostrar que con único software gratuito y accesible para todo el público, se pueden obtener modelos anatómicos y objetos 3D de gran utilidad en la práctica clínica.

Por otra parte, esta comparativa de programas informáticos requiere de conocimientos técnicos ampliados, de forma que sería más adecuado realizarlo desde el punto de vista de la ingeniería y desarrollo de producto, y no desde el ámbito sanitario.

Como conclusión, y reiterando la información expuesta previamente, cabe destacar los probados beneficios de incluir la impresión 3D en la práctica médica. Esto es especialmente reseñable con los modelos anatómicos, ya que el resultado quirúrgico está en manos de la experiencia y destreza del cirujano, y el hecho de mejorar el entendimiento de la anatomía específica de cada paciente y el poder practicar los procedimientos quirúrgicos sobre la misma con antelación, solo aumenta la seguridad y habilidad técnica del mismo.

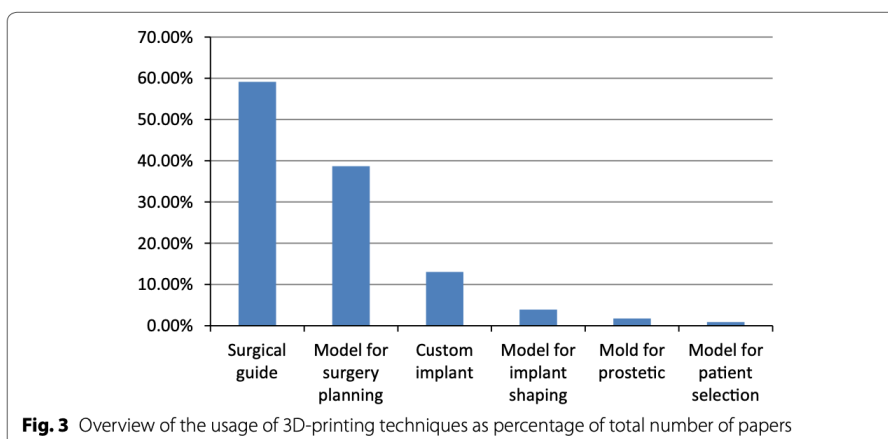
6. ANEXOS

Número de facetas máximas recomendadas en el modelo digital 3D según zona anatómica a reproducir (9).

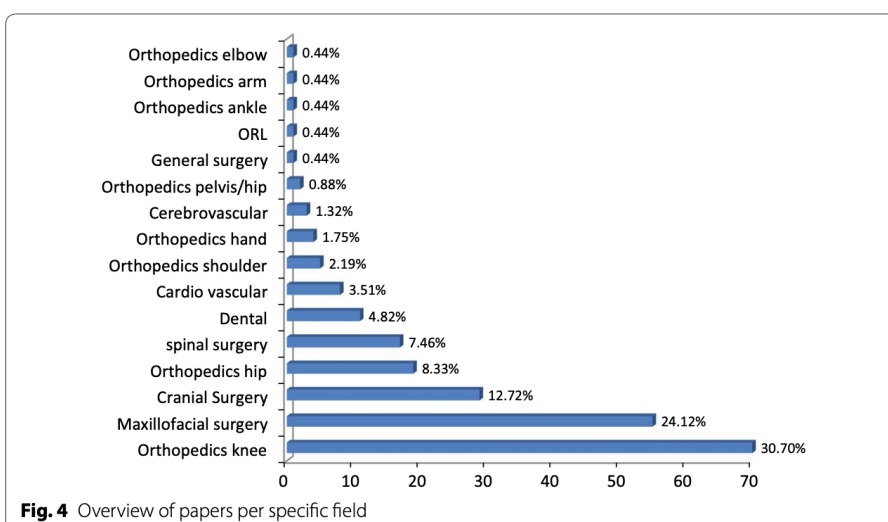
Anatomic Model	Maximum No. of Triangles*
Skull	600,000
Face	450,000
Mandible	200,000
Femur	300,000
Full spine	850,000

*Finer-detail models (eg, vascular) may require a higher triangle count.

Aplicaciones de la tecnología de impresión 3D según número de artículos publicados (12).



Revisión de número de publicaciones por especialidad en relación a la impresión 3D (12)



7. DECLARACIÓN DE INTERESES DE LOS PARTICIPANTES

Los participantes implicados en la elaboración de este protocolo declaran no tener intereses particulares.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Elena y Lorenzo, por inculcarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Por enseñarme que hay diferentes caminos para transitar y que no necesariamente debo seguir el que ellos escogieron. Por su gran amor, paciencia y apoyo incondicional.

A mi querido hermano Rafa, que me demuestra que la literatura, el cine y el arte también llenan el alma.

A mi abuela Adela, un espejo donde mirarme y una fuente infinita de amor, por enseñarme que hacer el bien debe ser una máxima, y que la “sal de la vida” está en vivir como especial la cotidianidad y en cuidar a nuestros seres queridos.

A toda mi familia. Habéis sido el mejor espacio en el que poder crecer.

A Isabel, Pedro y Amparo, maestros maravillosos que han sabido animarme a pensar de forma diferente, a buscar soluciones fuera de los libros, a ser crítica conmigo misma y con lo que sucede a mi alrededor. A admirar el conocimiento humano.

A Laura y a Ester, por ser las mejores amigas durante los momentos más difíciles que recuerdo. Por seguir siéndolo hoy en día.

A Laura T., Sara, Marina, Teresa, Irene, Laura B., María y Mar. Con vosotras he cambiado, crecido y reafirmado mi personalidad. Gracias por haber estado presentes en todo este recorrido. Cuando recuerde estos años con una sonrisa, que lo haré, será gracias a vosotras. Sois un regalo que no habría sabido pedir, porque sois mucho mejor de lo que yo hubiese podido imaginar.

A la ciudad de Pécs, por la libertad que me brindó y las personas que puso en mi camino.

Irónicamente, gracias también a mi diabetes. No la quise en su momento, pero me ha hecho madurar y agradecer estar aquí cada día.

A mis tutoras del TFG, Nuria y Adela, por guiarme en el proceso y enseñarme que innovar es necesario para ofrecer la mejor ayuda a los pacientes.

Y por último, gracias a la medicina por llenar de sentido mi vida y despertar en mi la ilusión por el futuro, la motivación para dedicarme a los demás, la paciencia para esperar lo que tenga que llegar, el pensamiento crítico a la hora de tomar decisiones y el amor por el cuerpo humano, que en su fragilidad nos permite disfrutar del mundo que nos rodea. Le estaré eternamente agradecida.

Todo lo que soy es gracias a vosotros.

BIBLIOGRAFÍA

1. Watson, R. A. (2014). A Low-Cost Surgical Application of Additive Fabrication. *Journal of Surgical Education*, 71(1). <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2013.10.012>
2. Wu, A.-M., Wang, K., Wang, J.-S., Chen, C.-H., Yang, X.-D., Ni, W.-F., & Hu, Y.-Z. (2018). The addition of 3D printed models to enhance the teaching and learning of bone spatial anatomy and fractures for undergraduate students: a randomized controlled study. *Annals of Translational Medicine*, 6(20). <https://doi.org/10.21037/atm.2018.09.59>
3. Bruns, N., & Krettek, C. (2019). 3D-Druck in der Unfallchirurgie. *Der Unfallchirurg*, 122(4). <https://doi.org/10.1007/s00113-019-0625-9>
4. Wu, A. M., Shao, Z. X., Wang, J. S., Yang, X. D., Weng, W. Q., Wang, X. Y., Xu, H. Z., Chi, Y. L., & Lin, Z. K. (2015). The accuracy of a method for printing three-dimensional spinal models. *PloS one*, 10(4), e0124291. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124291>
5. Perez, M., Block, M., Espalin, D., Winker, R., Hoppe, T., Medina, F., & Wicker, R. (2012). Sterilization of FDM-manufactured parts.
6. Villar Alarcón, M. (2 de noviembre de 2016). La impresión 3D: Qué es y sus técnicas de impresión. Comunidad IEBS. <https://comunidad.iebschool.com/impresoras3d/2016/11/02/la-impresion-3d-que-es-y-sus-tecnicas-de-impresion/>
7. Tresdpro. (19 de octubre de 2019). ¿Qué materiales utilizan las impresoras 3D [2021 guía]. Tresdpro. https://tresdpro.com/que-material-utilizan-las-impresoras-3d/#Filamento_PLA
8. ALL3DP. (9 de abril de 2020). Guía sobre tecnologías de impresión 3D. Los 11 tipos de impresoras. ALL3DP. <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>
9. Mitsouras, D., Liacouras, P., Imanzadeh, A., Giannopoulos, A. A., Cai, T., Kumamaru, K., George, E., Wake, N., Caterson, E. J., Pomahac, B., Ho, V. B., Grant, G. T., & Rybicki, F. J. (2015). Medical 3D Printing for the Radiologist. *RadioGraphics*, 35(7). <https://doi.org/10.1148/rg.2015140320>
10. George, E., Liacouras, P., Rybicki, F. J., & Mitsouras, D. (2017). Measuring and Establishing the Accuracy and Reproducibility of 3D Printed Medical Models. *RadioGraphics*, 37(5). <https://doi.org/10.1148/rg.2017160165>
11. Hoang, D., Perrault, D., Stevanovic, M., & Ghiassi, A. (2016). Surgical applications of three-dimensional printing: a review of the current literature & how to get started. *Annals of Translational Medicine*, 4(23). <https://doi.org/10.21037/atm.2016.12.18>
12. Tack, P., Victor, J., Gemmel, P., & Annemans, L. (2016). 3D-printing techniques in a medical setting: A systematic literature review. In *BioMedical Engineering Online* (Vol. 15, Issue 1). <https://doi.org/10.1186/s12938-016-0236-4>
13. Wu, W., Xu, W., Wan, C., & Fang, M. (2019). Preoperative Plan with 3D Printing in Internal and External Fixation for Complex Tibial Plateau Fractures. *Orthopaedic Surgery*, 11(4). <https://doi.org/10.1111/os.12466>

14. Andrés-Cano, P., Calvo-Haro, J. A., Fillat-Gomà, F., Andrés-Cano, I., & Perez-Mañanes, R. (2021). Papel del cirujano ortopédico y traumatólogo en la impresión 3D: aplicaciones actuales y aspectos legales para una medicina personalizada. *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, 65(2). <https://doi.org/10.1016/j.recot.2020.06.014>
15. Pumacayo-Cárdenas, S., Arias-Vela, G., & Quea-Pinto, E. (2020). Impresión 3D de rara patología congénita de aorta y vasos supraaórticos. *Revista Colombiana de Cardiología*, 27(2). <https://doi.org/10.1016/j.rccar.2019.10.005>
16. Squelch, A. (2018). 3D printing and medical imaging. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 65(3). <https://doi.org/10.1002/jmrs.300>
17. Morgan, C., Khatri, C., Hanna, S. A., Ashrafian, H., & Sarraf, K. M. (2019). Use of three-dimensional printing in preoperative planning in orthopaedic trauma surgery: A systematic review and meta-analysis. *World Journal of Orthopedics*, 11(1). <https://doi.org/10.5312/wjo.v11.i1.57>
18. Iqbal, F., Taufiq, I., Najjad, M. K. R., Khan, N., & Zia, O. Bin. (2016). Functional and Radiological Outcome of Surgical Management of Acetabular Fractures in Tertiary Care Hospital. *Hip & Pelvis*, 28(4). <https://doi.org/10.5371/hp.2016.28.4.217>
19. Kavalerskiy, G. M., Murylev, V. Y., Rukin, Y. A., Elizarov, P. M., Lychagin, A. V., & Tselisheva, E. Y. (2018). Three-Dimensional Models in Planning of Revision Hip Arthroplasty with Complex Acetabular Defects. *Indian journal of orthopaedics*, 52(6), 625–630. https://doi.org/10.4103/ortho.IJOrtho_556_16
20. Upex, P., Jouffroy, P., & Riouallon, G. (2017). Application of 3D printing for treating fractures of both columns of the acetabulum: Benefit of pre-contouring plates on the mirrored healthy pelvis. *Orthopaedics and Traumatology: Surgery and Research*, 103(3). <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2016.11.021>
21. Li, Y.-T., Hung, C.-C., Chou, Y.-C., Chen, J.-E., Wu, C.-C., Shen, H.-C., & Yeh, T.-T. (2019). Surgical Treatment for Posterior Dislocation of Hip Combined with Acetabular Fractures Using Preoperative Virtual Simulation and Three-Dimensional Printing Model-Assisted Precontoured Plate Fixation Techniques. *BioMed Research International*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3971571>
22. Huang, Z., Song, W., Zhang, Y., Zhang, Q., Zhou, D., Zhou, X., & He, Y. (2018). Three-dimensional printing model improves morphological understanding in acetabular fracture learning: A multicenter, randomized, controlled study. *PLOS ONE*, 13(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191328>
23. Maini, L., Mishra, A., Agarwal, G., Verma, T., Sharma, A., & Tyagi, A. (2018). 3D printing in designing of anatomical posterior column plate. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2018.07.009>
24. Lim, P. K., Stephenson, G. S., Keown, T. W., Byrne, C., Lin, C. C., Marecek, G. S., & Scolaro, J. A. (2018). Use of 3D Printed Models in Resident Education for the Classification of Acetabulum Fractures. *Journal of Surgical Education*, 75(6). <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2018.04.019>

25. IJpma, F. F. A., Meesters, A. M. L., Merema, B. B. J., ten Duis, K., de Vries, J.-P. P. M., Banierink, H., Wendt, K. W., Kraeima, J., & Witjes, M. J. H. (2021). Feasibility of Imaging-Based 3-Dimensional Models to Design Patient-Specific Osteosynthesis Plates and Drilling Guides. *JAMA Network Open*, 4(2). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2020.37519>
26. Fang, C., Cai, H., Kuong, E., Chui, E., Siu, Y. C., Ji, T., & Drstvenšek, I. (2019). Surgical applications of three-dimensional printing in the pelvis and acetabulum: from models and tools to implants. In *Unfallchirurg* (Vol. 122, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s00113-019-0626-8>
27. Huang, J.-H., Liao, H., Tan, X.-Y., Xing, W.-R., Zhou, Q., Zheng, Y.-S., Cao, H.-Y., & Zeng, C.-J. (2020). Surgical treatment for both-column acetabular fractures using pre-operative virtual simulation and three-dimensional printing techniques. *Chinese Medical Journal*, 133(4). <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000000649>
28. Ansari, S., Barik, S., Singh, S. K., Sarkar, B., Goyal, T., & Kalia, R. B. (2020). Role of 3D printing in the management of complex acetabular fractures: a comparative study. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*. <https://doi.org/10.1007/s00068-020-01485-z>
29. Woo, S.-H., Sung, M.-J., Park, K.-S., & Yoon, T.-R. (2020). Three-dimensional-printing Technology in Hip and Pelvic Surgery: Current Landscape. *Hip & Pelvis*, 32(1). <https://doi.org/10.5371/hp.2020.32.1.1>
30. Liu, K., Li, Z., Ma, Y., & Lian, H. (2019). 3D-printed pelvis model is an efficient method of osteotomy simulation for the treatment of developmental dysplasia of the hip. *Experimental and Therapeutic Medicine*. <https://doi.org/10.3892/etm.2019.8332>
31. 2014-2015. HXX. Blog de HXX. <http://hxx.es/the-blog/>
32. Service de Chirurgie Viscérale et oncologique, CHU de Rouen. [3DSlicer Tutorials]. (2020, March 29). Organ segmentation 1: Wrist bones, with model preparation for 3D printing [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=z22Pa9PNk1E&t=238s>